

ISSN 0203-3100 (print)  
ISSN 2524-1052 (on-line)

# Геофизический ЖУРНАЛ



**6**

2017

ТОМ 39

Geophysical  
journal

Главный редактор *В. И. СТАРОСТЕНКО*  
Заместитель главного редактора *Я. М. ХАЗАН*

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*В. Г. Бахмутов, Т. А. Белый, А. Б. Бобров, Т. К. Бурахович,*  
*С. А. Выжва, О. Б. Гинтов, Н. М. Гладких* (ответств. секретарь),  
*В. В. Гордиенко, Д. Н. Гринь, М. М. Довбнич, Т. П. Егорова, А. В. Кендзера,*  
*В. П. Коболев, И. Н. Корчагин, Э. Д. Кузьменко, В. В. Кулик, Р. И. Кутас, О. В. Легостаева,*  
*Д. В. Лысынчук, С. В. Мостовой, В. Д. Омельченко, М. И. Орлюк, А. П. Петровский,*  
*В. Н. Пилипенко, О. М. Русаков, М. И. Скипа, А. П. Толкунов, Ю. К. Тяпкин,*  
*О. В. Усенко, И. М. Цифра*

### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*В. Алказ* (Кишинев, Молдова), *У. Байер* (Потсдам, Германия), *Л. Бешуцью* (Бухарест, Румыния), *М. Биелик* (Братислава, Словакия), *С. В. Богданова* (Лунд, Швеция), *Р. Г. Гарецкий* (Минск, Беларусь), *А. Д. Гвишиани* (Москва, Россия), *Г. Георгиев* (София, Болгария), *А. О. Глико* (Москва, Россия), *А. Г. Гончаров* (Канберра, Австралия), *А. Гутерх* (Варшава, Польша), *Э. Дорми* (Париж, Франция), *М. С. Жганов* (Солт Лейк Сити, США), *С. С. Зилитинкевич* (Хельсинки, Финляндия), *Као Динх Тру* (Ханой, Вьетнам), *Г. И. Каратаев* (Минск, Беларусь), *Р. Келлер* (Оклахома, США), *А. И. Кобрунов* (Ухта, Россия), *С. Ковачикова* (Прага, Чехия), *Г. Г. Кулиев* (Баку, Азербайджан), *П. С. Мартышко* (Екатеринбург, Россия), *В. О. Михайлов* (Москва, Россия), *С. М. Оганесян* (Гюмри, Армения), *А. Сейнтот* (Бахум, Германия), *Р. Стифенсон* (Абердин, Великобритания), *М. Соссон* (Ницца, Франция), *Г. Тибо* (Копенгаген, Дания), *С. А. Тихоцкий* (Москва, Россия), *Т. Л. Челугзе* (Тбилиси, Грузия), *В. Чермак* (Прага, Чехия), *Н. В. Шаров* (Петрозаводск, Россия), *Т. Яник* (Варшава, Польша)

Editor-in-Chief *V. I. STAROSTENKO*  
Deputy Editor-in-Chief *Ya. M. KHAZAN*

### EDITORIAL BOARD

*V. G. Bakhmutov, T. A. Belyu, A. B. Bobrov, T. K. Burakhovich, M. M. Dovbnich,*  
*O. B. Gintov, N. M. Gladkykh* (Executive Secretary), *V. V. Gordienko, D. N. Gryn,*  
*A. V. Kendzera, V. P. Kobolev, I. N. Korchagin, V. V. Kulyk, R. I. Kutas, E. D. Kuz'menko,*  
*O. V. Legostaeva, D. V. Lysynchuk, S. V. Mostovoy, V. D. Omelchenko, M. I. Orlyuk,*  
*A. P. Petrovskiy, V. N. Pylypenko, O. M. Rusakov, M. I. Skipa, A. P. Tolkunov, I. M. Tsifra,*  
*Yu. K. Tyapkin, O. V. Usenko, S. A. Vyzhva, T. P. Yegorova*

### INTERNATIONAL EDITORIAL COUNSEL

*V. Alkaz* (Kishinev, Moldova), *U. Bayer* (Potsdam, Germany), *L. Beshutiu* (Bucharest, Romania), *M. Bielik* (Bratislava, Slovakia), *S. V. Bogdanova* (Lund, Sweden), *Cao Dinh Tru* (Hanoi, Vietnam), *T. L. Chelidze* (Tbilisi, Georgia), *V. Chermak* (Prague, Czech Republic), *E. Dormy* (Paris, France), *R. G. Garetsky* (Minsk, Belarus), *G. Georgiev* (Sofia, Bulgaria), *A. O. Gliko* (Moscow, Russia), *A. G. Goncharov* (Canberra, Australia), *H. H. Guliyev* (Baku, Azerbaijan), *A. Guterch* (Warsaw, Poland), *A. D. Gvishiani* (Moscow, Russia), *S. M. Hovhannisyan* (Gyumri, Armenia), *T. Janik* (Warsaw, Poland), *G. I. Karataev* (Minsk, Belarus), *R. Keller* (Oklahoma, USA), *A. I. Kobrunov* (Ukhta, Russia), *S. Kovachikova* (Prague, Czech Republic), *P. S. Martyshko* (Ekaterinburg, Russia), *V. O. Mikhailov* (Moscow, Russia), *A. Saintot* (Bochum, Germany), *N. V. Sharov* (Petrozavodsk, Russia), *R. Stephenson* (Aberdeen, Great Britain), *M. Sosson* (Nice, France), *H. Thybo* (Copenhagen, Denmark), *S. A. Tikhotsky* (Moscow, Russia), *M. S. Zhdanov* (Solt Lake City, USA), *S. S. Zilitinkevich* (Helsinki, Finland).

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ

## Geophysical journal

# ЖУРНАЛ

Основан в июле 1979 г.

Выходит 6 раз в год

Том 39

Международный  
журнал

An International  
Journal

№ 6 • 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Нгуен Х. Б., Исаев В. И.</i> Коллекторы нефти кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр.....	3
<i>Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я.</i> Скоростные модели верхней мантии континентальных и океанических рифтов .....	20
<i>Усенко О. В.</i> Периодизация и характерные особенности глубинных процессов в докембрии на примере Украинского щита.....	41
<i>Орлюк М. И., Марченко А. В., Роменец А. А.</i> Пространственно-временные изменения геомагнитного поля и сейсмичность .....	84
<i>Верпаховская А. О., Пилипенко В. Н., Пилипенко Е. В.</i> Формирование изображения глубинного геологического строения по данным морской сейсморазведки МОВ и МПВ .....	106
<i>Зейгельман М. С., Панченко Н. В.</i> Построение графического образа целевого функционала и его использование для поиска многовариантных решений обратной задачи магниторазведки.....	122

## Конференции

<i>Бурахович Т. К., Коболев В. П.</i> Актуальные проблемы геосреды и зондирующих систем.....	139
--	-----

## Юбилеи

<i>Старостенко В. И., Гинтов О. Б., Ентин В. А.</i> Украинский Геологический Комитет: 100 лет со времени создания, история реорганизаций, результаты работы.....	144
<i>Ентин В. А.</i> 60 лет в строю: к геофизической стороне одной биографии и не только.....	162
<i>Георгию Трофимовичу Продайводе — 80 лет</i> .....	201
Сводное оглавление .....	206

## ЗМІСТ

<i>Нгуєн Х. Б., Ісаєв В. І.</i> Колектори нафти кристалічного фундаменту родовища Білий Тигр.....	3
<i>Гордієнко В. В., Гордієнко Л. Я.</i> Швидкісні моделі верхньої мантиї континентальних та океанічних рифтів .....	20
<i>Усенко О. В.</i> Періодизація та характерні особливості глибинних процесів в докембрії на прикладі Українського щита .....	41
<i>Орлюк М. І., Марченко А. В., Роменець А. А.</i> Просторово-часові зміни геомагнітного поля і сейсмічність .....	84
<i>Верпахівська О. О., Пилипенко В. М., Пилипенко О. В.</i> Формування зображення глибинної геологічної будови за даними морської сейсмозв'язки МВХ та МЗХ .....	106
<i>Зейгельман М. С., Панченко Н. В.</i> Побудова графічного образу цільового функціоналу та його використання для пошуку багатоваріантних розв'язків оберненої задачі магніторозвідки .....	122

## Конференції

<i>Бурахович Т. К., Коболєв В. П.</i> Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем.....	139
--	-----

## Ювілеї

<i>Старостенко В. І., Гінтов О. Б., Єнтін В. А.</i> Український Геологічний Комітет: 100 років з часу створення, історія реорганізацій, результати роботи .....	144
<i>Єнтін В. А.</i> 60 років в строю: до геофізичної сторони однієї біографії і не тільки.....	162
<i>Георгію Трохимовичу Продайводі — 80 років</i> .....	201

## CONTENTS

<i>Nguyen H. B., Isaev V. I.</i> Oil reservoirs of the crystalline basement of the White Tiger field .....	3
<i>Gordienko V. V., Gordienko L. Ya.</i> Velocity models of the upper mantle of the continental and oceanic rifts.....	20
<i>Usenko O. V.</i> Periodization and specific features of deep processes in Precambrian by example of the Ukrainian shield .....	41
<i>Orlyuk M. I., Marchenko A. V., Romenets A. A.</i> Spatial-temporal changes in the geomagnetic field and seismicity .....	84
<i>Verpakhovska A.O., Pilipenko V. N., Pylypenko O. V.</i> Formation geological depth image according to refraction and reflection marine seismic data .....	106
<i>Zeygelman M. S., Panchenko N. V.</i> The construction of the graphical image of the target functional and its use for the search for multivariant solutions of the inverse magneto-prospecting problem .....	122

## Conference

<i>Burakhovich T. K., Kobolev V. P.</i> Actual problems of the geo-environment and sounding systems.....	139
--	-----

## Jubillei

<i>Starostenko V. I., Gintov O. B., Yentyn V. A.</i> Ukrainian Geological Committee: 100 years since the creation, history of reorganizations, results of work .....	144
<i>Yentyn V. A.</i> 60 years in the ranks: to the geophysical side of one biography and not only.....	162
<i>Georgiy Trokhimovich Prodayvoda — 80 years</i> .....	201

## Коллекторы нефти кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр

© *Х. Б. Нгуен<sup>1</sup>, В. И. Исаев<sup>2</sup>, 2017*

<sup>1</sup>ООО «Совместная компания «РУСВЬЕТПЕТРО», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

Поступила 4 октября 2017 г.

Аналіз тектоніки і петротипів порід кристалічного фундаменту нафтового родовища Білий Тигр (шельф Південного В'єтнаму) і даних каротажу 165 свердловин виявив тектонічні й петрологічні чинники утворення та інтенсивності вторинної пористості в колекторах фундаменту. Вивчення порового простору порід-колекторів методами геофізичних досліджень свердловин ґрунтується головним чином на акустичних і електричних характеристиках матричної пористості, тріщин і каверн. Виявлено стійку закономірність зміни (зменшення) пористості з глибиною. Ця закономірність спостерігається у межах усіх виділених геологічних блоків. Утворення вторинної пористості в породах фундаменту зумовлено насамперед тектонічним чинником, вплив якого з глибиною зменшується. Найбільше цей вплив позначається на породах Центрального і Північного блоків. Характер розподілу пористості залежить від розподілу петротипів порід, з чим пов'язані спрямованість та інтенсивність вторинних змін порід-колекторів. Для порід-колекторів фундаменту вказаних вище блоків встановлено значущі залежності питомого дебіту від вторинної пористості, яку визначають за даними каротажу.

**Ключові слова:** родовище Білий Тигр, колектори нафти фундаменту, тектоніка, петротипи, пористість, каротаж, питомий дебіт.

**Введение.** Работами вьетнамских и российских геологов (Е. Г. Арешев, В. П. Гаврилов, Ч. Л. Донг, В. А. Кошляк, Х. В. Куи, Ф. А. Киреев, А. Е. Лукин, В. В. Поспелов, А. И. Тимурзиев, Д. Т. Хоанг, Н. Т. Шан, В. Л. Шустер и др.) была установлена региональная нефтегазоносность фундамента северной части Зондского шельфа, где был открыт ряд месторождений (Белый Тигр, Дракон, Руби, Заря, Черный Лев, Белый Лев, Желтый Тунец и др.). На месторождении Белый Тигр разрабатывается крупная залежь нефти в гранитоидах фундамента, которая является самой большой во Вьетнаме.

В отличие от традиционных пород-колекторов, имеющих преимущественно гранулярную пористость, коллекторы кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр характеризуются

каверново-трещинной пористостью, имеют различное распределение как по площади, так и по разрезу.

Изучение методами геофизических исследований скважин (ГИС) характера распространения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород-колекторов фундамента является актуальной задачей. Решение этой задачи позволяет выявить геологические особенности и основные факторы образования пористости пород фундамента, уточнить геолого-геофизическую модель резервуара и тем самым определить правильный подход к решению геологических задач при поисках и разведке, рационально осуществлять разработку месторождения. Кроме того, изучение нефтегазоносности магматических пород приобретает особую актуальность в связи с выявлением фундаментальных законо-

мерностей нефтидогенеза, включая генезис резервуаров и нефтей в фундаменте [Старостенко и др., 2011].

Породы-коллекторы кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр являются *нетрадиционными объектами, которые не имеют хорошо изученных аналогов*. Поэтому изучение данного объекта опирается на геологическую изученность региона и месторождения, а также фактические геолого-геофизические данные.

**Геология и нефтегазоносность.** Кылуонгская впадина (Cuu Long Basin) распространяется вдоль побережья Южного Вьетнама (рис. 1). Длина впадины 450—500 км, ширина 75—100 км. Мощность кайнозойских осадков во впадине достигает 6—8 км. В пределах впадины выделяются Центрально-Кылуонгская и Южно-Кылуонгская мульды, которые разделяются Центральным поднятием. В пределах Центрального поднятия с юго-запада на

северо-восток прослеживается ряд положительных структур, среди которых Чом-Чом, Дракон (Rong), Белый Тигр (Bach Ho), Заря (Rang Dong) и др.

Геологический разрез месторождения Белый Тигр представлен докайнозойскими кристаллическими породами фундамента и преимущественно терригенными породами осадочного чехла (рис. 2). Суммарная толщина вскрытых образований фундамента по вертикали достигает 1750 м (скв. БТ-7009), осадочного чехла — 4740 м (БТ-11).

**Фундамент** осадочного чехла представляет собой горстообразный батолит сложного строения размером 30 × 6—8 км. Батолит состоит из трех сводов — Южного, Центрального и Северного, которые разбиты серией разломов основного субмеридионального простирания и подчиненного — субширотного (рис. 2, 3 и 4).

Радиологические определения абсо-

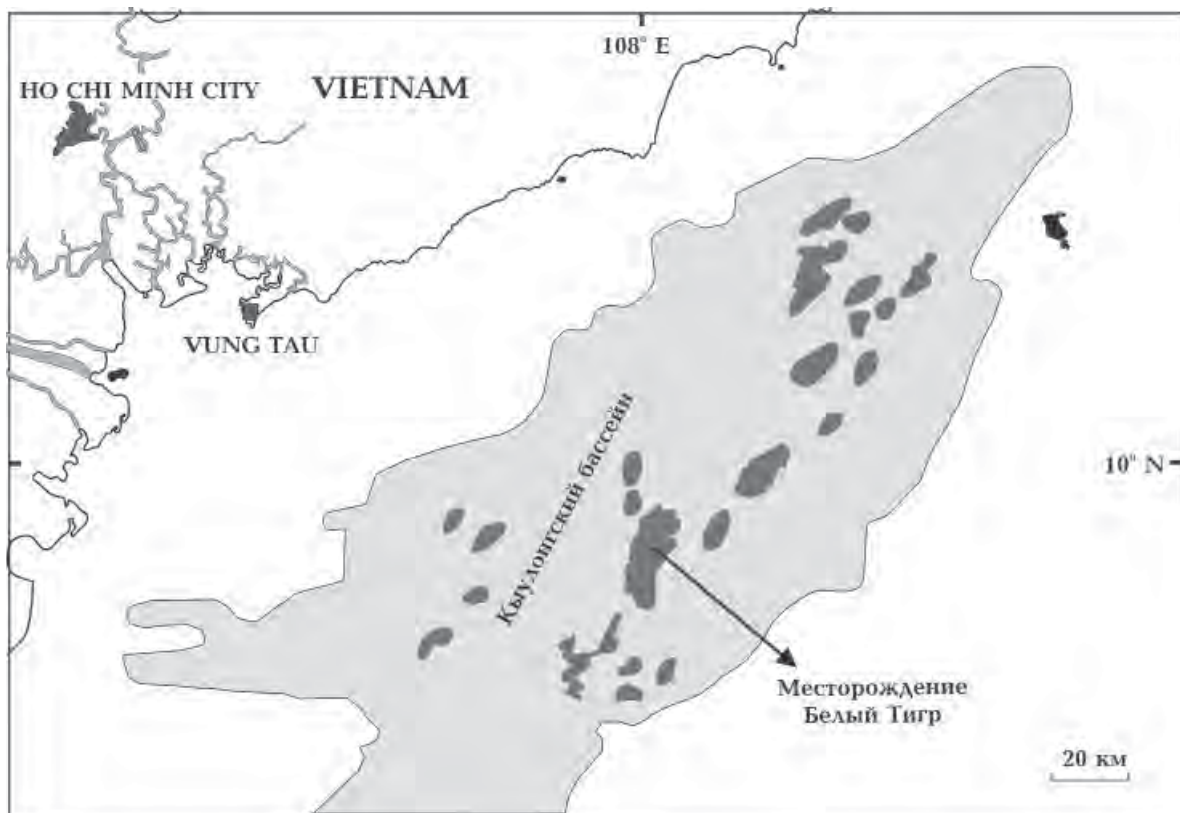


Рис. 1. Положение месторождения Белый Тигр на обзорной схеме месторождений УВ Кылуонгской впадины.



Рис. 2. Схематический продольный геологический разрез месторождения Белый Тигр: 1 — тектоническое нарушение; 2 — залежь нефти в осадочном чехле; 3 — траектория скважины; 4 — нерасчлененные отложения; 5 — отложения нижнего миоцена; 6 — отложения верхнего олигоцена; 7 — отложения нижнего олигоцена; 8 — залежь кристаллического фундамента.

лутного возраста позволили выделить в составе фундамента месторождения три разновозрастных интрузивных магматических комплекса (см. рис. 2): комплекс *Хон-Хоай* — триасового возраста, комплекс *Дин-Куан* — юрского возраста, комплекс *Ка-На* — мелового возраста.

Комплекс *Дин-Куан*, сложенный преимущественно гранитоидами, распространен в центральной части Северного свода, а комплекс *Хон-Хоай* (кварцевые амфибол-биотитовые монцодиориты и амфибол-биотитовые диориты) занимает восточную часть Южного свода. Комплекс *Ка-На*, представленный гранитами, слагает весь Центральный свод, а также фрагментами Северный и Южный. Породы фундамента в различной степени изменены **вторичными процессами**. Среди вторичных минералов наиболее широко распространены цеолит и кальцит [Хоанг Динь Тиен, 1999; Поспелов, 2005].

Анализ взаимосвязи пористости и проницаемости пород фундамента с их петрографическим составом показывает, что наиболее продуктивными породами, обладающими высокой приточностью, являются кислые породы — в основном граниты, а также гранодиориты [Isaev, Nguen, 2013]. Высокие ФЕС кислых пород фундамента по сравнению с менее кислыми и средними потенциально обусловлены более интенсивными контракционными процессами при полимериза-

ции кислых гранитных магм и большей устойчивостью гранитов к вторичным гидротермальным процессам — меньшей кольматацией трещинного пространства кальцитом и циацитом [Кошляк, 2002; Гаврилов и др., 2010].

**Разрез осадочного чехла** расчленен по литологическим, палинологическим и палеонтологическим признакам на свиты местной стратиграфической шкалы (см. рис. 2): *Чаку* (нижний олигоцен), *Чатан* (верхний олигоцен), *Батьхо* (нижний миоцен), *Кошнон* (средний миоцен), *Донгнай* (верхний миоцен) и *Бьендонг* (нерасчлененные плиоцен-четвертичные отложения). В средней части разреза свиты *Чатан* глинистые породы содержат массовые концентрации органического вещества и являются хорошими нефтематеринскими породами [Хоанг Динь Тиен, 1999; Серебренникова и др., 2012; Богоявленский и др., 2016].

Месторождение Белый Тигр находится в сложной **в тектоническом отношении** центральной части Кылулонгского бассейна. Фундамент месторождения Белый Тигр и в целом Кылулонгская впадина Зондского шельфа подвергались многократному тектоническому воздействию: от семи [Хоанг Динь Тиен, 1999] до восьми [Поспелов, 2005] стадий растяжения с таким же количеством сменявших их стадий воздымания (сжатия). К концу мезозоя Зондский шельф представлял собой устойчивую кон-



Рис. 3. Схема распространения петротипов пород кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр: 1 — граница геологического блока; 2 — граниты; 3 — адамелит; 4 — кварцевые монзониты; 5 — гранодиориты; 6 — кварцевые биотитовые монцодиориты; 7 — кварцевые амфибол-биотитовые монцодиориты; 8 — кварцевые биотитовые диориты; 9 — амфибол-биотитовые диориты; 10 — тектоническое нарушение; 11 — скважина.



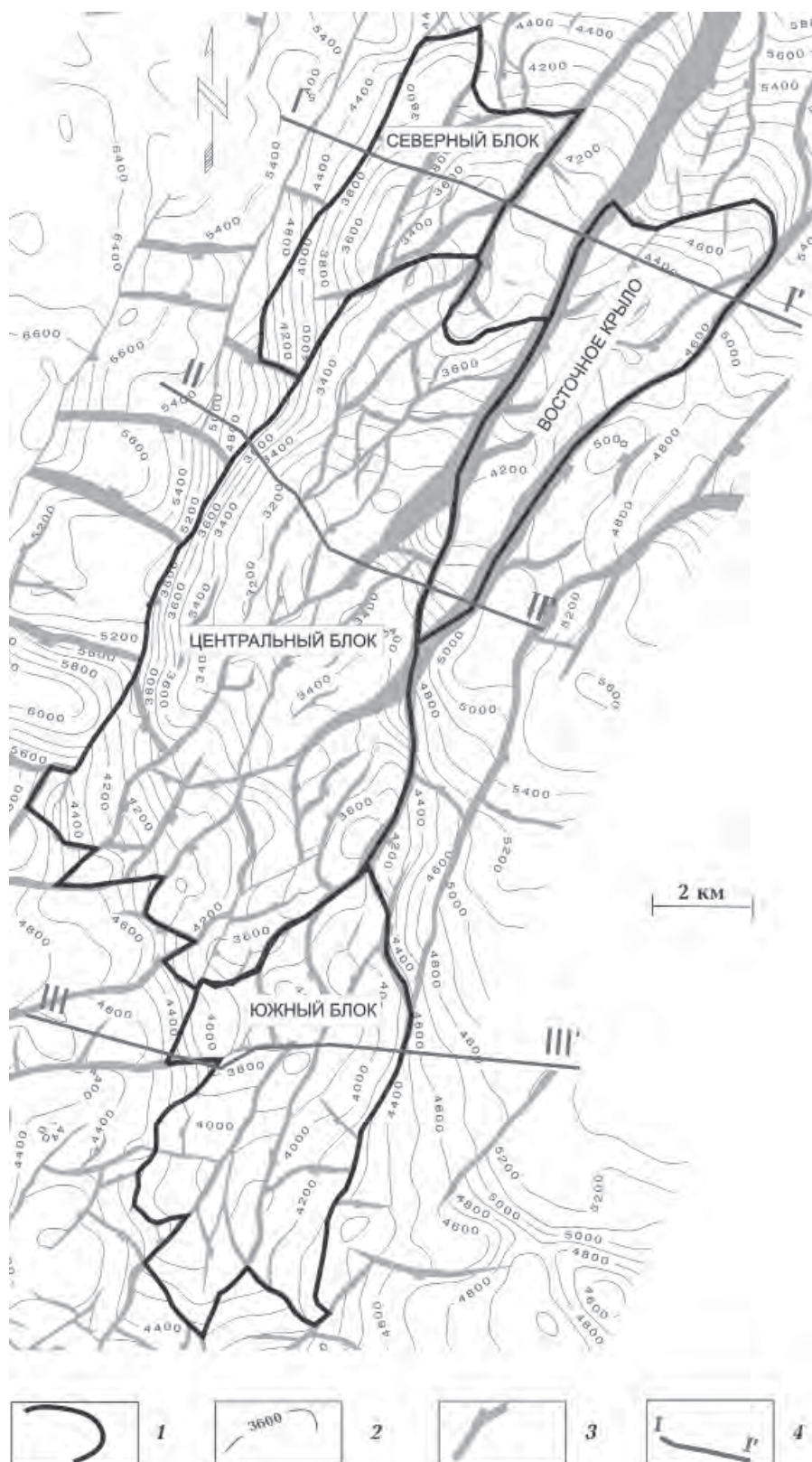


Рис. 4. Обзорная структурная карта кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр: 1 — граница геологического блока; 2 — изогипса, м; 3 — тектоническое нарушение; 4 — линия поперечного геологического разреза.

тинентальную плиту [Арешев и др., 1996; Пospelов 2005; Гаврилов и др., 2010].

В позднем олигоцене в результате столкновения Индо-Австралийской и Евразийской суперплит [Гаврилов и др., 2010] Индокитайская плита двигалась к юго-востоку (рис. 5). Вследствие этого возникло сжимающее тектоническое напряжение с эпицентром на северо-западе

Кыулонгского бассейна. Тектогенез среднемиоценовой эпохи характеризовался преобладанием процессов сжатия [Хоанг Динь Тиен, 1999]. Были образованы ряд взбросов в Центральном поднятии в направлении с северо-востока на юго-запад. Как отмечено в работе [Ngô Thường San, Cù Minh Hoàng, 2009], главная фаза сжатия в позднем олигоцене имела важное значе-

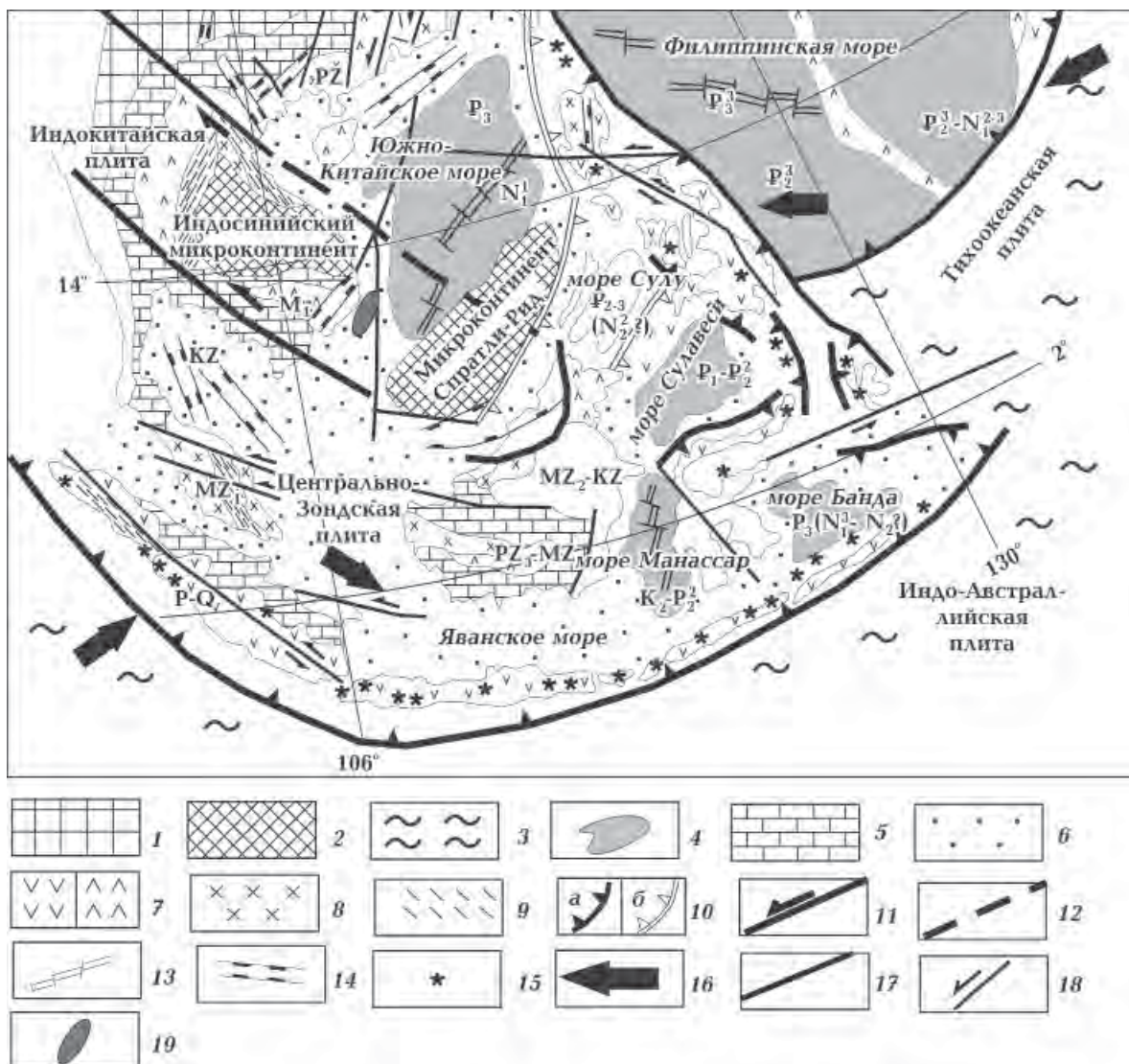


Рис. 5. Обзорная тектоническая схема Юго-Восточной Азии (с использованием [Игнатов, 2010]): 1 — континентальные плиты; 2 — микроконтиненты; 3 — океанические плиты; 4 — контуры новообразованной в результате спрединга океанической коры окраинных морей; 5 — древние шельфы; 6 — современные шельфы; 7 — островодужные вулканы; 8 — коллизионные гранитоиды; 9 — складчатые комплексы; 10 — зоны субдукции (а — активные (конвергентные границы плит), б — неактивные); 11 — трансформные границы плит и микроплит; 12 — нечеткие границы плит и микроплит, проводимые по зонам рассеянной сейсмичности; 13 — активные (современные) зоны спрединга; 14 — крупные рифты; 15 — современный вулканизм; 16 — направление движения плит; 17 — разломы; 18 — сдвиги; 19 — Кыулонгский бассейн.

ние в процессе образования пустотности.

Зона тектонического сжимающего напряжения подтверждена комплексом полевых геофизических работ и тектонических исследований в обнажениях вдоль побережья Южного Вьетнама. Система взбросов с большой амплитудой четко выявлена по данным сейсморазведки на западном крыле месторождения Белый Тигр (рис. 6). Тектоническая фаза сжатия в позднем олигоцене, вероятно, оказала дифференциальное влияние на процесс образования пустотности фундамента месторождения Белый Тигр. Наибольшее влияние тектонического фактора сказывается на породах Центрального и Северного блоков, что установлено экспериментально (сетчатая текстура, кливаж) [Хоанг Динь Тиен, 1999].

Для Центрального блока месторождения выявлена закономерность изменения (уменьшения) с глубиной пористости пород-коллекторов фундамента [Isaev, Nguen, 2013]. Вероятно, главным фактором, обуславливающим образование вторичной пустотности в породах фундамента, является тектонический, влияние которого заметно ослабевает в нижних частях блока [Хоанг Динь Тиен, 1999].

**Залежи нефти** установлены в породах фундамента, отложениях олигоценового и нижнемиоценового возраста (см. рис. 2 и 6). Выделяются четыре объекта разработки — породы фундамента, отложения нижнего олигоцене, верхнего олигоцене

и нижнего миоцена. Фундамент является главным объектом, имеющим высокую продуктивность и основные запасы (порядка 500 млн т).

В разрезе свиты Чаку —  $P_3^1$  выделяются нефтеносные горизонты VI, VII+VIII, IX, X+XI, которые отделены друг от друга глинистыми разделами толщиной от нескольких до десятков метров. Эти горизонты характеризуются невыдержанностью мощностей и состава пород. Отложения свиты общей мощностью 300—400 м сложены чередованием песчаных пластов, пачек аргиллитов и глин речной, озерной и лагунной фаций. С погружением отложений в сторону синклиналей их мощность возрастает с одновременным ухудшением коллекторских свойств песчаных пластов.

Отложения свиты Чатан —  $P_3^2$  мощностью от 50 до 1800 м несогласно залегают на отложениях свиты Чаку, а на более приподнятых участках (Центральный свод) — непосредственно на поверхности фундамента (см. рис. 2). В разрезе свиты встречаются линзы песчаников и алевролитов, объединяемые в пачки I, II, III, IV, V. В некоторых из них установлены залежи нефти.

Свита Батъхо —  $N_1^1$  (мощность 750—900 м) по литолого-петрографическому составу подразделяется на две части: верхнюю и нижнюю. В самой верхней части разреза выделяются пачки роталиевых глин, которые распространяются почти во всей Кылуонгской впадине и являются



Рис. 6. Поперечные геологические разрезы по линии I—I'; II—II' и III—III' (см. рис. 4) через Северный, Центральный и Южный блоки. Условные обозначения те же, что на рис. 2.

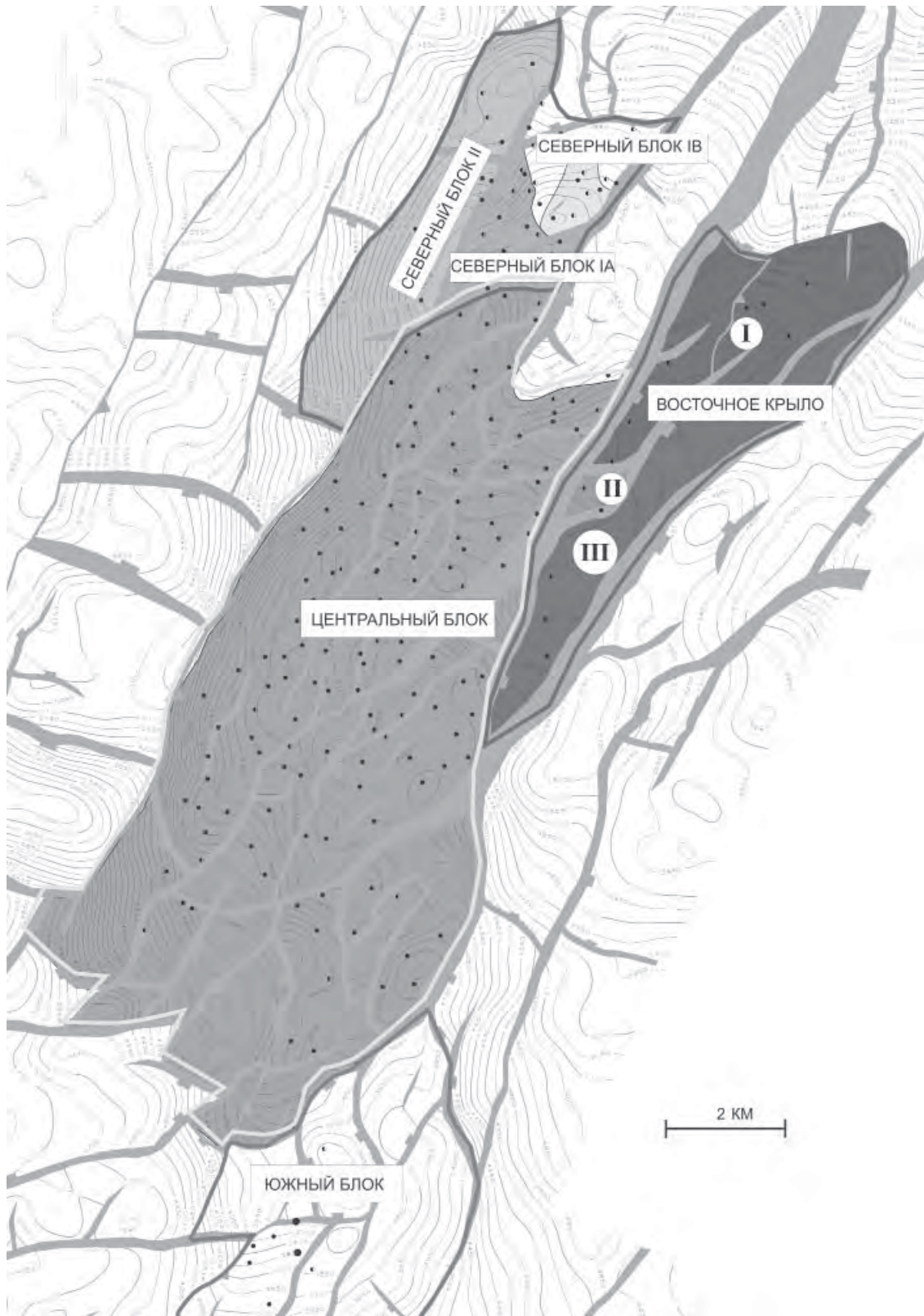


Рис. 7. Схема районирования фундамента на блоки по гидродинамическим особенностям. Условные обозначения те же, что на рис. 3 и 4.

региональной покрывкой для всей площади впадины. В разрезе свиты выделяются продуктивные горизонты 23, 24, 25, 26, 27, представленные кварцевыми и аркозовыми песчаниками. Залежи нефти горизонтов 23 и 24 имеют структурное, пластовое строение, а продуктивные горизонты 25, 26 и 27 развиты в виде отдельных линз. Пласты свиты *Батхо* —  $N_1^1$  являются основными объектами поиска и разведки в осадочном чехле Кылуонгской впадины.

В разрезах свит *Коншон* —  $N_1^2$  (мощность 700—900 м), *Донгнай* —  $N_1^3$  (мощность 650—700 м) и *Бьендонг* —  $N_2+Q$  (мощность 650—700 м) продуктивных пластов не установлено.

Мониторинг изменения пластового давления в процессе разработки свидетельствует о том, что массивная залежь фундамента имеет блоковый характер. По этим данным можно разделить резервуар фундамента на четыре блока (рис. 7): Центральный, Северный, Южный и Восточное крыло. Каждый геологический блок фундамента имеет индивидуальные гидродинамические свойства [Чан Ле Донг и др., 2006]. Центральный блок имеет наиболее выдержанные и стабильные гидродинамические характеристики. Сходный характер наблюдается в Северном блоке II, где преобладают граниты и гранодиориты.

**Методы каротажа скважин при изучении разреза фундамента.** При исследовании коллекторских свойств пород фундамента месторождения Белый Тигр используют комплекс каротажных исследований, который можно разделить на две группы методов [Нгуен, Исаев, 2013а,б] — традиционные методы ГИС и методы изучения трещиноватости пород стенки скважины.

*Комплекс традиционных методов* изучения литологии и плотности включает акустический с регистрацией продольной волны, нейтрон-нейтронный каротаж и другие радиоактивные каротажы. Петрофизическая основа комплексной интерпретации опирается на множественность минерального состава и модель порового пространства. Модель порового пространства гранитоидных коллекторов состоит

из трещин, каверн и структурных пор. При этом общая пористость представляет собой сумму закрытых и открытых пор, трещин и каверн, придающих породам фильтрационно-емкостные свойства.

*Методы изучения трещиноватости пород* включают методы удельного электрического сопротивления (боковой каротаж) и сканирования (FMI — электрическое сканирование, DSI — акустический сканирующий каротаж, UBI — ультразвуковое акустическое зондирование). Методы, входящие во вторую группу, позволяют выявить зоны дробления, трещиноватости и определить трещинную пористость, параметры трещин.

**Выявленные закономерности изменения пустотности кристаллических пород.** Построены зависимости вторичной пористости пород фундамента, определенной по данным ГИС, от глубины (рис. 8). При этом значения пористости осреднены по 25-метровым толщинам (срезам).

Анализ изменчивости порового пространства в **Центральном блоке** (по данным каротажа 108 скважин, рис. 8, а) приводит к следующим результатам.

1. Фиксируется наличие коллекторов до абсолютной отметки минус 4967 м, что послужило определению нижней отметки при подсчете запасов по категории С2.

2. Устанавливается очевидная закономерность уменьшения величины вторичной пористости с глубиной. «Гладкость» зависимости обусловлена достаточно однородным составом петротипов пород фундамента Центрального блока (см. рис. 3).

3. Повышенная вторичная пористость является следствием интенсивности тектонического фактора. Эпицентр олигоценовой зоны сжатия находится ближе всего к этой части месторождения. Здесь фундамент взброшен до 2 км (см. рис. 6).

4. Образованию интервала повышенной пустотности в приповерхностной части фундамента наиболее приподнятого Центрального блока способствует древняя зона гипергенеза [Кошляк, 2002; Гаврилов и др., 2010]. По данным ГИС дезинтегри-

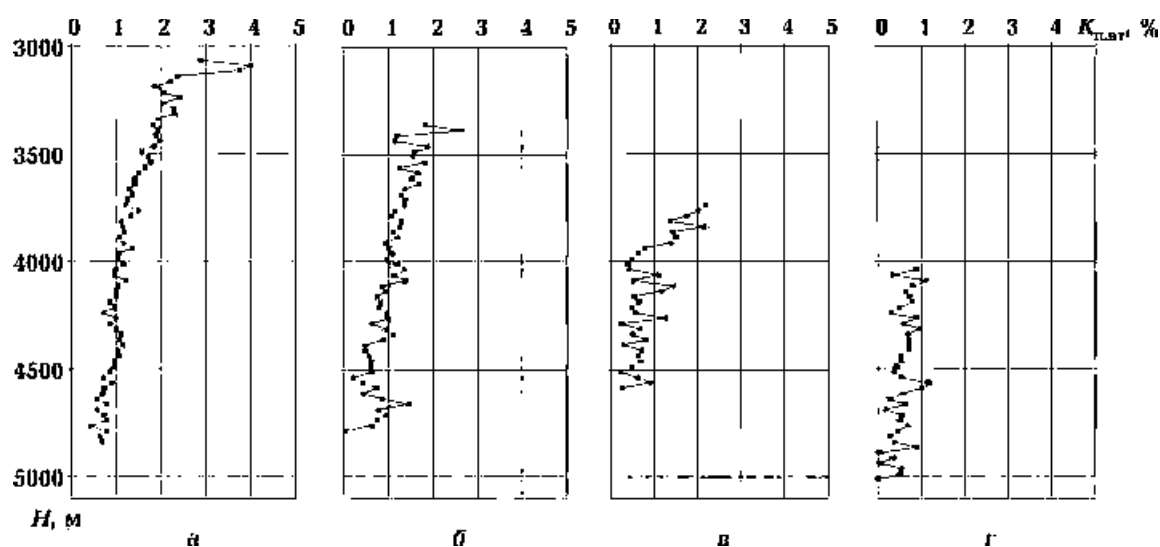


Рис. 8. Изменение вторичной пористости ( $K_{п.вт}$ ) пород-коллекторов фундамента месторождения Белый Тигр от глубины: *а* — Центральный блок (108 скважин); *б* — Северный блок (37 скважин); *в* — Южный блок (8 скважин); *г* — Восточное крыло (12 скважин).

рованные «корни» этой коры имеют мощность от 20 до 40 м и более.

Анализ изменчивости порового пространства в **Северном блоке** (по данным каротажа 37 скважин, рис. 8, б) приводит к следующим результатам.

1. Фиксируется наличие коллекторов до абсолютной отметки минус 4754 м, что послужило определению нижней отметки при подсчете запасов по категории С2.

2. Для Северного блока установлена закономерность уменьшения величины вторичной пористости с глубиной.

3. Так же, как в Центральном блоке, повышенная вторичная пористость в верхней части фундамента Северного блока обусловлена интенсивным тектоническим фактором. Кроме того, для Северного блока допускается существование древней зоны гипергенеза, имеющей мозаичный характер площадного распространения [Кошляк, 2002].

4. Изменение вторичной пористости с глубиной по сравнению с Центральным блоком имеет более сложный характер. Вероятная причина — латеральная неоднородность ФЕС пород фундамента Северного блока, обусловленная ансамблем петротипов (см. рис. 3). Именно в пониженной восточной части Северного блока преоб-

ладают кварцевые биотитовые монцодиориты (см. рис. 3). По результатам изучения шлифов установлено, что они претерпели наиболее сильные вторичные гидротермальные преобразования, которые во многих случаях создают каверново-поровую пустотность (интервал 4200—4400 м).

Анализ изменчивости порового пространства в **Южном блоке** (по данным каротажа 8 скважин, рис. 8, в) приводит к следующим результатам.

1. Для Южного блока фиксируется наличие коллекторов до абсолютной отметки минус 4572 м.

2. Как и в Центральном, и Северном блоках, в Южном блоке устанавливается закономерность уменьшения вторичной пористости с глубиной.

3. Кривая изменения вторичной пористости с глубиной имеет «пилообразный характер», что свидетельствует о чередовании разуплотненных и уплотненных зон по вскрытому разрезу. Возможно, пластообразные интервалы разуплотнения могли сформироваться при контракционном расслоении интрузива по субгоризонтальным плоскостям либо это следствие периодичности разновременных тектонических движений [Кошляк, 2002].

4. Низкая пористость пород Южно-

го блока, вероятно, является следствием удаленности от эпицентра олигоценового сжатия (амплитуда взброса Южного блока заметно меньше, см. рис. 6), а также многообразия петротипов умеренно кислого и среднего составов (см. рис. 3).

Анализ изменчивости порового пространства в **Восточном крыле** (по данным каротажа 12 скважин, см. рис. 8, г) приводит к следующим результатам.

1. Фиксируется наличие коллекторов до абсолютной отметки минус 4861 м.

2. Низкая вторичная пористость пород фундамента Восточного крыла, вероятно, обусловлена удалением от эпицентра олигоценового тектонического сжатия (амплитуда взброса фундамента уменьшается на 1 км и более, см. рис. 4 и 6).

3. Отсутствие интервала повышенной вторичной пористости в приповерхностной части фундамента Восточного крыла может быть связано с отсутствием древних гипергенных процессов.

**Характер продуктивности коллекторов фундамента.** На основе кинематического и динамического анализа систем трещин, выполненного А. И. Тимурзиевым [Тимурзиев, 2008], установлено, что *дебиты* скважин тесно связаны с *проницаемостью*. Этот вывод хорошо согласуется с более поздними данными [Нгуен, 2013а]. В работе [Нгуен, 2013а] показана прямая связь удельных дебитов ( $G$ ) работающих интервалов в породах кристаллического фундамента и проницаемости ( $K_{пр}$ ), определенной по результатам гидродинамических исследований скважин. Здесь применена методика расчета  $K_{пр}$ , в которой переменным параметром является только депрессия.

Результаты сопоставления удельной продуктивности коллекторов выделенных гидродинамических блоков (см. рис. 7) с пористостью, определенной по данным ГИС, следующие.

**Центральный блок** (158 определений дебитов по 24 скважинам, рис. 9, а).

1. Получены зависимости удельного дебита от общей и вторичной пористости достаточно высокой корреляции.

2. Нижнее граничное значение общей

пористости коллекторов скважин Центрального блока, которое обеспечивает приток нефти, составляет 1,5 %, а нижнее граничное значение вторичной пористости — 0,15 %.

3. Зависимости удельного дебита от общей и вторичной пористостей имеют квазипараболический вид. Возможно, именно параболическая зависимость (в области  $K_{п.об} > 2,5$  %) характерна для пород-коллекторов фундамента.

4. Значимые зависимости удельного дебита не только от вторичной пористости, но и от общей пористости, зависимости однотипные (квазипараболические), подтверждают высокую однородность пород-коллекторов фундамента. В Центральном блоке распространен преимущественно один петротип — гранит (см. рис. 3).

**Северный блок** (40 определений дебитов по семи скважинам, рис. 9, б).

1. Зависимость удельного дебита от общей пористости имеет довольно низкий коэффициент корреляции, а зависимость удельного дебита от вторичной пористости выражена более четко.

2. Более выраженная зависимость удельного дебита от вторичной пористости, чем от общей пористости, указывает, вероятно, на то, что приток нефти получен, в основном, из динамической каверново-трещинной пористости.

3. Низкий коэффициент корреляции зависимости удельного дебита от общей пористости может быть обусловлен тем, что породы фундамента Северного блока сложены различными петротипами (см. рис. 3) и дифференцированно подвергнуты вторичному изменению. Последнее вызывает образование разной величины результирующей проницаемости.

4. Нижнее граничное значение общей пористости пород Северного блока, которое обеспечивает приток нефти, — 2,3 %. По сравнению с Центральным блоком (1,5 %) граничное значение для Северного блока значительно больше. Это также подтверждает значительную переработку менее однородных пород Северного блока гидротермальными процессами.

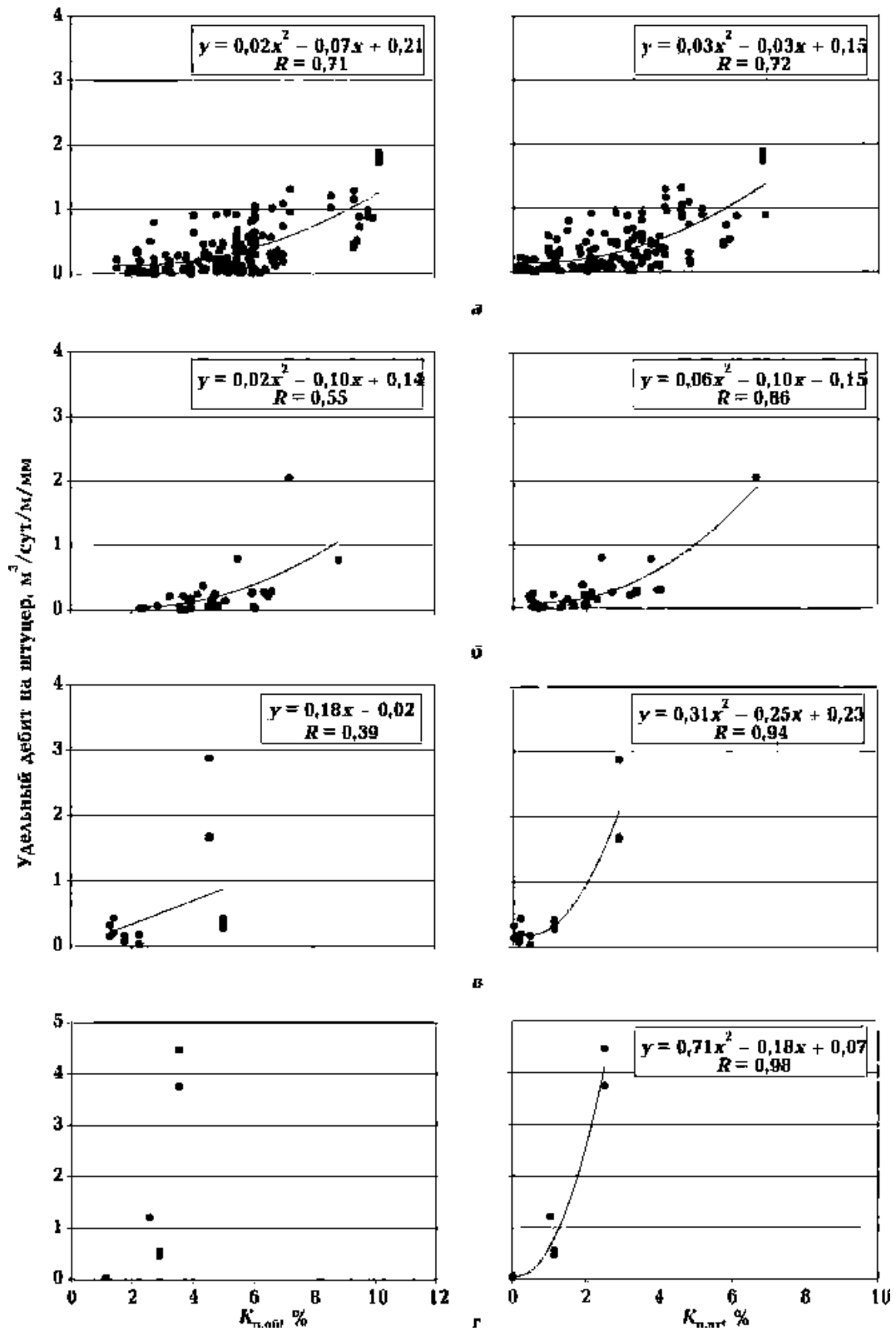


Рис. 9. Кросс-плоты и зависимости удельных дебитов ( $G$ ) от общей ( $K_{п.об}$ ) и вторичной ( $K_{п.вт}$ ) пористости работающих интервалов в породах кристаллического фундамента Центрального блока (а), Северного блока (б), Южного блока (в) и Восточного крыла (г) месторождения Белый Тигр.



5. Нижнее граничное значение вторичной пористости на приток пород-коллекторов Центрального блока составляет 0,15 %, а Северного блока — значительно больше (0,4 %). Это, вероятно, также связано с большей неоднородностью пород фундамента Северного блока по петротипам и, особенно, с наличием в петротипах среднего состава вторичных цеолита и кальцита, ухудшающих фильтрационные свойства.

**Южный блок** (17 определений дебитов по двум скважинам, рис. 9, в).

1. Имеет место значимая зависимость удельного дебита от вторичной пористости. А с повышением общей пористости видна только тенденция увеличения удельного дебита.

2. Отсутствие значимой зависимости удельного дебита от общей пористости можно объяснить сложностью и относительно небольшими величинами порового пространства пород-коллекторов Южного блока, что, вероятно, обусловлено пестротой петротипов с малой долей гранитов и гранитоидов (см. рис. 3).

3. В Южном блоке имеются отдельные интервалы с высокой способностью давать притоки нефти. Здесь значение удельного дебита<sup>1</sup> достигает 3 м<sup>3</sup>/сут/м/мм. Это возможно объясняется наличием отдельных высокопроводящих каналов нефти, обусловленных формированием (под воздействием гидротерм) каверново-поровой пустотности в петротипах умеренно кислого и среднего состава.

4. Малое количество скважин, в которых проведено определение интервалов притока (всего 17 интервалов), влияет на адекватность построенной зависимости удельного дебита от вторичной пористости.

**Восточное крыло** (6 определений дебитов по двум скважинам, рис. 9, г).

1. Хотя количество работающих интервалов скважин Восточного крыла очень мало (всего 6 интервалов), но все же можно

<sup>1</sup> Удельный дебит ( $G$ ) рассчитан делением дебита работающего интервала (м<sup>3</sup>/сут) на мощность интервала (м) и диаметр штуцера (мм).

наметить зависимость удельного дебита от вторичной пористости.

2. Значимую зависимость удельного дебита от общей пористости построить не удается.

3. Как в Южном блоке, так и в Восточном крыле имеются интервалы с высокой способностью давать притоки нефти. Здесь значение удельного дебита достигает 4,5 м<sup>3</sup>/сут/м/мм. Возможно, эти интервалы являются отдельными проводящими каналами гидротермального генезиса.

**Выводы.** Результаты исследования закономерностей и особенностей пористости и продуктивности каверново-трещинных пород-коллекторов кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр позволяют сделать следующие выводы.

1. В пределах отдельных блоков выявлена устойчивая закономерность изменения (уменьшения) пористости с глубиной. Эта закономерность наблюдается по всем выделенным геологическим блокам.

2. Главным фактором, обуславливающим образование вторичной пористости в породах фундамента, является тектонический, который с глубиной уменьшает свое влияние. Наибольшее влияние тектонического фактора сказывается на породах приподнятых Центрального и Северного блоков, ближе всего прилегающих к эпицентру олигоценового тектонического сжатия.

3. Важным фактором, обуславливающим характер распределения пористости и проницаемости, является распределение петротипов пород, чем обусловлены направленность и интенсивность вторичных гидротермальных изменений пород-коллекторов. Формирование каверново-поровой пустотности гидротермального генезиса превалирует в Южном блоке и Восточном крыле, представленных в основном петротипами умеренно-кислого и среднего состава.

**Заключение.** По выявленным закономерностям и характеру распределения ФЕС можно судить о степени перспективности каждого из четырех блоков фундамента месторождения Белый Тигр. Блоки

по степени перспективности ранжируются следующим образом.

*Центральный блок* имеет наиболее высокую перспективность по показателям значений вторичной пористости и приточности. Это обусловлено наиболее сильным положительным влиянием тектонического фактора, наиболее благоприятным петротипом пород (граниты) и наличием древней коры выветривания.

*Северный блок* имеет высокое значение вторичной пористости пород и приточности. Это обусловлено сильным положительным влиянием тектонического фактора и наличием древней коры выветривания.

*Южный блок* имеет невысокие значения пористости пород и только единичные приточные интервалы. Это обусловлено менее сильным влиянием тектонического фактора.

*Восточное крыло* имеет низкие значения вторичной пористости пород и только единичные приточные интервалы. Это обусловлено слабым влиянием тектонического фактора и отсутствием древней коры выветривания.

Отдельные интервалы, дающие высокие притоки нефти в Южном блоке и Восточном крыле, вероятно, обусловлены каверново-поровой пустотностью гидротермальной природы.

Для пород-коллекторов фундамента Центрального и Северного блоков установлены значимые зависимости удельного дебита от вторичной пористости, определяемой по данным каротажа. Зависимость для

Центрального блока наиболее значимая, ее предлагается использовать для прогноза продуктивности пород-коллекторов фундамента Центрального блока. Зависимость удельного дебита от вторичной пористости можно вполне использовать в качестве прогностической в Северном блоке.

Таким образом, результаты выявления особенностей и закономерностей пористости и продуктивности, наряду с тем, что они могут быть использованы в практике разработки месторождения Белый Тигр, имеют особую актуальность, что ставит их в ряд исследований фундаментальной геологии. Дело в том, что «решение проблемы нефтегазоносности кристаллических пород может или кардинально «сдвинуть» теорию нефтегазообразования в область эндогенного (мантийного) генезиса углеводородов, или же оставить процессам нефтегазообразования осадочную толщу литосферы...» (А. В. Кудельский, 2013). При этом еще раз подчеркнем, что данные исследования месторождения Белый Тигр опирались на геологическую изученность региона и месторождения [Арешев и др., 1996; Хоанг Динь Тиен, 1999; Кошляк, 2002; Поспелов, 2005; Чан Ле Донг и др., 2006; Ngô Thường San, Cù Minh Hoàng, 2009; Гаврилов и др., 2010], а также на фактические геолого-геофизические данные [Isaev, Nguen, 2013; Нгуен, 2013а,б; Нгуен, Исаев, 2013а,б] без привлечения той или иной концепции нафтидогенеза.

*Статья подготовлена с использованием материалов кандидатской диссертации Х. Б. Нгуена.*

### Список литературы

Арешев Е. Г., Гаврилов В. П., Донг Ч. Л., Киреев Ф. А., Шан Н. Т. Модель геодинамического развития континентального шельфа юга СРВ. *Нефтяное хозяйство*. 1996. № 8. С. 15—17.

Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Дзюбло А. Д., Иванов А. Н., Ле Вьет Хай, Варламов Д. И. Нефтегазоносность кристаллического фундамента шель-

фа южного Вьетнама. *Нефтяное хозяйство*. 2016. № 8. С. 98—104.

Гаврилов В. П., Гулев В. А., Киреев Ф. А., Донцов В. В., Соколов В. И. Гранитоидные коллекторы и нефтегазоносность южного шельфа Вьетнама. Москва: Недра, 2010. 294 с.

Игнатова В. А. Сравнение геодинамических моделей и нефтегазоносности бассейнов

- Дальнего Востока России и Юго-Восточной Азии. *Тихоокеанская геология*. 2010. Т. 29. № 2. С. 27—42.
- Кошляк В. А. Гранитоидные коллекторы нефти и газа. Уфа: Гау, 2002. 242 с.
- Нгуен Х. Б. Геофизические исследования скважин при изучении магматических коллекторов месторождения Белый Тигр. *Известия ТПУ*. 2013а. Т. 323. № 1. С. 27—33.
- Нгуен Х. Б. Фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов кристаллического фундамента месторождения Белый Тигр (по данным каротажа): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: ТПУ, 2013б. 22 с.
- Нгуен Х. Б., Исаев В. И. Геофизические исследования скважин при изучении коллекторов в кристаллическом фундаменте месторождения Белый Тигр. *Геофиз. журн.* 2013а. Т. 35. № 3. С. 131—145.
- Нгуен Х. Б., Исаев В. И. Продуктивность магматических коллекторов месторождения Белый Тигр. *Картажник*. 2013б. № 9. С. 64—76.
- Поспелов В. В. Кристаллический фундамент: геолого-геофизические методы изучения коллекторского потенциала и нефтегазонасности. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 260 с.
- Серебренникова О. В., Ву В. Х., Савиных Ю. В., Краснаярова Н. А. Генезис нефтей месторождения Белый Тигр (Вьетнам) по данным о составе насыщенных ациклических углеводородов. *Известия ТПУ*. 2012. Т. 320. № 1. С. 134—137.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Заец Л. Н., Донцов В. В., Савиных Ю. В. Об участии суперглубинных флюидов в нефтедогенезе (по данным изучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр). *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 4. С. 3—32.
- Тимурзиев А. И. Технология прогнозирования трещиноватости на основе трехмерной геомеханической и кинематической модели трещинного коллектора. *Геофизика*. 2008. № 3. С. 41—60.
- Хоанг Динь Тиен. Условия нефтегазообразования и формирования углеводородных скоплений в кайнозойских осадочных бассейнах континентального шельфа СРВ: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Вунгтау: СП «Вьетсовпетро», НИПИморнефтегаз, 1999. 325 с.
- Чан Ле Донг, Чан Ван Хой, Фунг Дак Хай, Хоанг Ван Куи, Северинов Е. В., Иванов А. Н. Особенности геологии и разработки залежи фундамента месторождения Белый Тигр. *Нефтяное хозяйство*. 2006. № 6. С. 24—26.
- Isaev V. I., Nguen H. B., 2013. Cavitation in Oil-Gas Reservoirs of the Crystalline Basement from the Well Logging Data on the White Tiger Field in Vietnam. *Russian Journal of Pacific Geology* 7(4), 237—246. doi: 10.1134/S1819714013040040
- Ngo Thuong San, Cu Minh Hoang, 2009. Mesozoic tectonics and Cuu Long basin formation. *Tạp chí dầu khí* (3), 15—21 (in Vietnamese).

## Oil reservoirs of the crystalline basement of the White Tiger field

© H. B. Nguen<sup>1</sup>, V. I. Isaev<sup>2</sup>, 2017

Analysis of tectonics and rock petrotypes of The White Tiger oil field (the Southern Vietnamese shelf), and logs data of 165 wells revealed tectonic and petrological factors of formation and intensity of the secondary cavitation in the basement reservoirs. Studying of the pore space of rock reservoirs by the wells logging method is primarily based on acoustic and electric characteristics of the matrix porosity, fractures and caverns. The consistent pattern of variability (reduction) of porosity with depth was revealed. This pattern occurs in all selected geological blocks. The major factor causing the formation of the secondary cavitation in basement rocks is the tectonic factor, which reduces its influence

with depth. The tectonic factor has the greatest influence on rocks of the Central and Northern blocks. An important factor causing the pattern of the porosity allocation is the allocation of rock petrotypes related with the direction and intensity of the secondary cavitation of rock reservoirs. Significant specific yield dependencies on the secondary cavitation determined by logs data were found for rock reservoirs of the basement in the Central and Northern blocks.

**Key words:** The White Tiger field, oil reservoirs of the basement, tectonics, petrotypes, cavitation, logging, specific yield.

## References

- Areshev E. G., Gavrilov V. P., Dong Ch. L., Kireev F. A., Shan N. T., 1996. Model of geodynamic development of the continental shelf of the South of SRV. *Neftyanoye khozyaystvo* (8), 15—17 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A., Dzyublo A. D., Ivanov A. N., Le V'et Haj, Varlamov D. I., 2016. Oil-and-gas content of the crystal base of the shelf of the southern Vietnam. *Neftyanoye khozyaystvo* (8), 98—104 (in Russian).
- Gavrilov V. P., Gulev V. L., Kireev F. A., Doncov V. V., Sokolov V. I., 2010. Granitoid collectors and oil-and-gas content of the southern shelf of Vietnam. Moscow: OOO Nedra Publ. House, 294 p. (in Russian).
- Ignatova V. A., 2010. Comparison of geodynamic models and oil-and-gas content of basins of the Far East of Russia and Southeast Asia. *Tikhookeanskaya geologiya* 29(2), 27—42 (in Russian). doi: 10.1134/S1819714010020028.
- Koshlyak V. A., 2002. Granitoid collectors of oil and gas. Ufa: Publ. House «Tau», 242 p. (in Russian).
- Nguyen H. B., 2013a. Geophysical surveys of wells when studying magmatic collectors of the field the White Tiger. *Izvestiya TPU* 323(1), 27—33 (in Russian).
- Nguyen H. B., 2013b. Filtration-capacitive relationships of reservoir rocks of the crystalline basement of the White Tiger deposit (according to logging data): Abstract of the dis. Cand. geol.-min. Sci. Tomsk: TPU, 22 p. (in Russian).
- Nguyen H. B., Isaev V. I., 2013a. Geophysical surveys of wells when studying collectors in the crystal base of the field the White Tiger. *Geofizicheskiy zhurnal* 35(3), 131—145 (in Russian).
- Nguyen H. B., Isaev V. I., 2013b. Productivity of magmatic reservoirs of the White Tiger deposit. *Karotazhnik* (9), 64—76 (in Russian).
- Pospelov V. V., 2005. Crystal base: geologic-geophysical methods of studying of collection potential and oil-and-gas content. Moscow-Izhevsk: Institute for Computer Research; SRC «Regular and chaotic dynamics», 260 p. (in Russian).
- Serebrennikova O. V., Vu V. H., Savinyh Yu. V., Krasnoyarova N. A., 2012. Genesis of the White Tiger (Vietnam) oil deposits from the data on the composition of saturated acyclic hydrocarbons. *Izvestiya TPU* 320(1), 134—137 (in Russian).
- Starostenko V. I., Lukin A. E., Tsvetkova T. A., Zaits L. N., Dontsov V. V., Savinyh Yu. V., 2011. On the participation of super-deep fluids in naftidogeneza (according to the study of the unique oil deposit of the White Tiger. *Geofizicheskiy zhurnal* 33(4), 3—32 (in Russian).
- Timurziev A. I., 2008. Technology of forecasting of jointing on the basis of three-dimensional geo-mechanical and kinematic model of a fracture collector. *Geofizika* (3), 41—60 (in Russian).
- Hoang Din' Tien, 1999. Conditions of oil and gas formation and formation of hydrocarbon accumulations in the Cenozoic sedimentary basins of the continental shelf of Vietnam: Thesis. Dis. geol.-min. Sci. Vungtau: JV Vietsovpetro, Nipimorneftegaz, 325 p. (in Russian).
- Chan Le Dong, Chan Van Hoj, Fung Dak Haj, Hoang Van Kui, Severinov E. V., Ivanov A. N., 2006. Feature of geology and development of a deposit of the base of the field White Tiger. *Neftyanoye khozyaystvo* (6), 24—26 (in Russian).
- Isaev V. I., Nguyen H. B., 2013. Cavitation in Oil-Gas Reservoirs of the Crystalline Basement

from the Well Logging Data on the White Tiger Field in Vietnam. *Russian Journal of Pacific Geology* 7(4), 237—246. doi: 10.1134/S1819714013040040

*Ngo Thuong San, Cu Minh Hoang*, 2009. Mezo-Cenozoic tectonics and Cuu Long basin formation. *Tạp chí dầu khí* (3), 15—21 (in Vietnamese).

## Скоростные модели верхней мантии континентальных и океанических рифтов

© В. В. Гордиенко, Л. Я. Гордиенко, 2017

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина  
Поступила 27 сентября 2017 г.

Побудовано моделі — одновимірні розподіли швидкості поширення поздовжніх сейсмічних хвиль — для верхньої мантиї рифтових систем континентів, що безпосередньо межують із серединно-океанічними хребтами (СОХ). Визначено відмінність моделей згаданих типів структур. Під близькими до континентів СОХ (але розташованими в океанічній земній корі) швидкісні розрізи практично не відрізняються від встановлених швидкісних розрізів у межах океанів. Наведено максимальні аномалії швидкості. Під континентальними рифтовими системами аномальність менша, у деяких випадках — через наявність в їх межах масивів, що не охоплені процесами рифтогенезу або ті процеси проходять у нетипових умовах. Зіставлено експериментальні (частково за літературними даними) швидкісні моделі з побудованими відповідно до схем глибинних процесів за адвекційно-поліморфною гіпотезою. Визначено їх узгодженість.

**Ключові слова:** континенти, океани, верхня мантия, швидкісні моделі, глибинні процеси.

**Введение.** Статья продолжает серию публикаций авторов, посвященных одномерным скоростным моделям (по Р-волнам) верхней мантии различных регионов. В предыдущих работах были рассмотрены модели океанических структур [Гордиенко, Гордиенко, 2012, 2015, 2016а,б; Gordienko, 2016b и др.]. На данном этапе предполагается исследование молодых континентальных рифтов. Предварительное рассмотрение имеющихся данных по современным процессам и геологической истории этих регионов показывает не только близость происходящих в них глубинных процессов изученным в океанах, но и наличие районов непосредственных их контактов. Такие «связки», как хребты Восточно-Индийский и Карлсберг — рифт Аденского пролива — Красное море — зона Афар (Джибути) — Восточно-Африканская рифтовая зона (ВАРЗ); рифт Калифорнийского залива — провинция Бассейнов и Хребтов (ПБХ) в североамериканских Кордильерах; хребет Гаккеля

(Нансена) в Арктическом океане — Момский рифт (хребет Черского) в Верхояно-Чукотском складчатом поясе, наличие Пантеллерийского рифта на коре субокеанической мощности внутри Рено-Ливийской рифтовой системы, демонстрируют возможность распространения сходных по характеру тепломассопереноса явлений, переходящих из океанических условий в континентальные. Такая связь может рассматриваться как косвенное подтверждение близости глубинных процессов рифтогенеза и океанизации [Gordienko, 2016a,b]. Она заслуживает специального изучения, в котором сейсмологические исследования могут сыграть заметную роль. Их можно применить и для контроля правильности выбора схем глубинных процессов, предполагаемых используемой авторами адвекционно-поліморфною гіпотезою (АПГ).

Контроль предусматривает построение модели тепломассопереноса в коре и верхней мантии активного региона, соз-

дание на ее основе современной тепловой модели тектоносферы и расчет по ней скоростного разреза верхней мантии. Последний вычисляется по скоростному разрезу неактивизированной докембрийской платформы внесением в него изменений, соответствующих различиям в глубинных температурах ( $T$ ) мантии платформы и изучаемого региона.

**О мантийных температурах.** Магматизм

рифтовых систем создает условия для максимального (по сравнению с другими эндогенными режимами) выноса мантийных ксенолитов. Часть из них характеризует температуру на глубинах, где они изменены активным процессом. В принципе, возможен непосредственный контроль ими тепловой модели по АПГ. Однако практически это оказывается нереальным. Ксенолиты выносятся на всех эта-

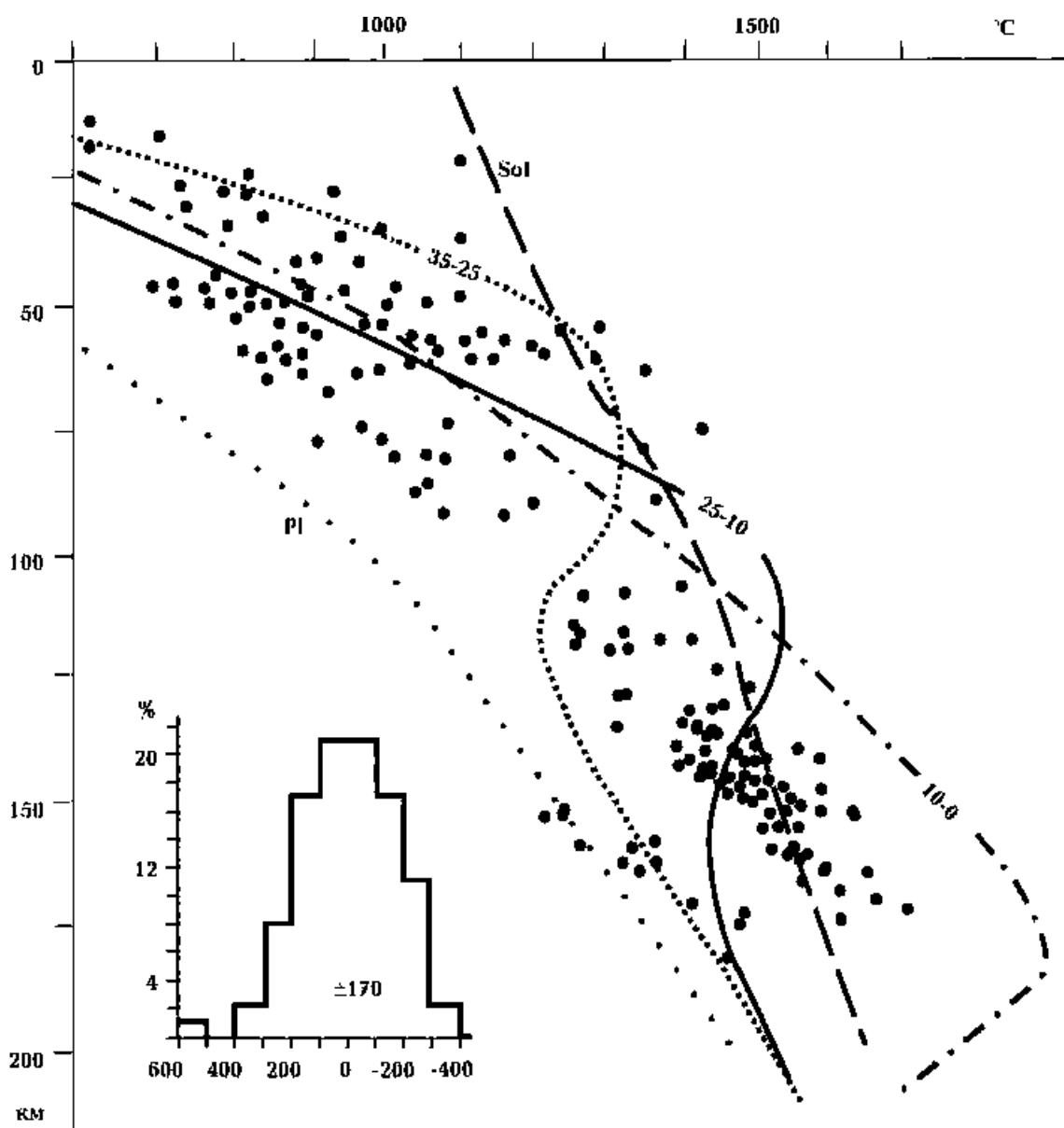


Рис. 1. Данные геотермометров и расчетные (по АПГ) тепловые модели разных этапов континентально-рифтогенеза. Sol — температура начала частичного плавления мантийных пород. Pl — температура в верхней мантии неактивизированной докембрийской платформы. Цифры у кривых — возраст в млн лет трех этапов магматизма в провинции Бассейнов и Хребтов Кордильер Северной Америки. В большинстве изучаемых рифтовых системах эти этапы имеют близкий возраст.

пах магматизма рифтов в периоды существования различных тепловых моделей. В большинстве публикаций нет сведений, позволяющих установить принадлежность ксенолитов одному из трех (по АПГ) этапов рифтогенеза. В результате довольно значительный фактический материал позволяет лишь констатировать, что имеющиеся данные не противоречат принятой модели (рис. 1). Используются данные по континентальным частям перечисленных выше рифтов, а также Байкальской рифтовой зоны, Монголии, Южной Америки, рифта Рио-Гранде и др. [Nixon, 1983; Olsen, 1995; Sobolev et al., 1996; Геншафт и др., 2000; Глебовицкий и др., 2001, 2003; Kaeser et al., 2006; Салтыкова, 2008 и др.].

Реальные ошибки определения температуры оцениваются в 50—100 °С, глубин — в 10—15 км [Геншафт и др., 2000 и др.]. Последнее обстоятельство создает примерно такую же погрешность  $T$ , т. е. можно ожидать вариаций температуры только из-за ошибок на 100—120 °С. Между тепловыми моделями мантии рифтов, построенными по данным геотермометров (при осреднении множества данных в каждом регионе), обнаруживаются расхождения в среднем около 100 °С [Геншафт и др., 2000; Гибшнер, 2009 и др.]. При сравнении с расчетными температурами проявляется и погрешность их вычисления. Параметры области наиболее значительного частичного плавления (из которой выносится магма на последнем этапе рифтогенеза) не представлены ксенолитами (см. рис. 1).

Поэтому неудивительно, что отклонения данных геотермометров от распределений  $T$  на втором этапе развития рифта (примерно через 20 млн лет после первого акта тепломассопереноса) составляют в среднем 170 °С, что эквивалентно вариации расчетной скорости на 0,1 км/с. Все рассматриваемые далее рифты находятся на конечной стадии развития. Отклонения от соответствующей расчетной тепловой модели будут значительно больше. Подобный метод контроля теряет смысл, что заставляет вернуться к намеченному выше направлению работы.

**Методика исследования.** Как и в ранее проведенных авторами работах данного направления, в этой предусмотрена следующая последовательность действий.

1. На выбранной по геологическим признакам территории проводится обобщение имеющейся сейсмологической информации о скоростных разрезах коры и верхней мантии, которые затем используются в качестве моделей первого приближения при расчете годографа, согласующегося с экспериментальным в регионе. Естественно, речь идет о двух различных массивах информации: для океанической и континентальной частей [Glahn et al., 1993; Olsen, 1995; Sobolev et al., 1996; Ritter, 2011; Koulakov et al., 2009, 2016; Gordienko, Gordienko, 2016 и др.].

2. Собирается информация о временах пробега сейсмических волн вдоль траекторий, позволяющих предполагать, что построенный годограф характеризует верхнюю мантию именно изучаемого региона (<http://www.isc.ac.uk>). Для построения годографа, отражающего пробег продольных волн ( $V_p$ ) через всю верхнюю мантию и часть переходной зоны к нижней, необходимы угловые расстояния около 25°. Не все рифтовые системы обладают таким размером, их элементы бывают непрямолинейны, собственно рифтогены в пределах систем часто перемежаются значительными блоками, не затронутыми активными процессами. Это создает трудности при отборе материала и истолковании результативного скоростного разреза.

Времена пробега волн пересчитываются для единой глубины источников — несколько ниже раздела М. При этом использовались осредненные литературные данные о мощности земной коры в регионе и скоростях в нужном интервале глубин. Построенный годограф для удобства редуцируется с учетом скорости 8,2 км/с.

3. Определяется качество построенных годографов по величине отклонений индивидуальных точек от осредняющей кривой. Согласно оценкам в работе [Назарова и др., 2010], отклонение около 2 с может быть обусловлено только ошибкой в опре-



делении планового положения эпицентра землетрясения при реальной погрешности информации об одномерной скоростной модели региона, используемой для расчета параметров очага. Погрешность определения глубины очага также вносит вклад в величину отклонения, заметно увеличивая его. По данным работы [Тараканов, 2006] ошибка в определении момента события 1—1,2 с. Погрешность положения эпицентра  $\pm(10—15)$  км, глубины очага —  $\pm 10$  км. Погрешность определения координат эпицентра составляет около  $0,1^\circ$  широты и долготы [Отчет..., 2008]. Оценки погрешности расчета для большей части годографа не меньше 1—1,5 с, скорее всего, они значительней, но обоснованно их установить не удается.

В качестве критерия пригодности годографа для использования была принята средняя величина отклонения индивидуальных точек от него не более 2 с. Такие же значения часто встречаются в результатах исследований других авторов [Feng et al., 2007 и др.].

4. Рассчитывается скоростной разрез верхней мантии, соответствующий годографу, который наиболее полно согласуется с экспериментальным. Расчетный годограф вычисляется по программе SEIS-83 И. Пшенчика и В. Червени.

5. Как и в предыдущих работах этого направления, на первом этапе проводилось изучение геологической истории каждого региона по литературным данным [Милановский, Короновский, 1973; Милановский, 1983; Магматические..., 1987; Olsen, 1995; Грачев, 1996; Gordienko, 2016a,b и др.]. Активные процессы в континентальных частях рассматриваемых рифтовых систем начинаются примерно синхронно (за некоторыми исключениями — см. ниже) около 40—30 млн лет назад. Для океанических частей характерен магматизм MORB. Для континентальных преобладает бимодальный базальт-риолитовый тип, на инициальном этапе встречаются нехарактерные для второй половины кайнозоя диатремы и дайки кимберлитоподобных пород и карбонатитов. В большинстве слу-

чаев можно выделить три этапа развития. Эти типичные элементы геологической истории позволяют применить к рассматриваемым регионам представления АПГ о глубинном процессе рифтогенеза [Gordienko, 2016a] и построить современную тепловую модель тектоносферы, общую для большинства изученных систем.

6. Полученная по сейсмологическим данным скоростная модель сравнивается с независимо установленной по тепловой. Делается вывод о соответствии или несоответствии экспериментальных величин прогнозу по АПГ. Степень соответствия должна оцениваться с учетом погрешностей обеих конструкций. Приведенные выше вероятные отклонения индивидуальных значений времен пробега волн от осредняющего годографа указывают на возможную погрешность определения скорости в значительном интервале глубин (не менее 50—100 км) в 0,05—0,10 км/с. Примерно такая же вероятная величина погрешности  $V_p$  обусловлена ошибками в построении тепловой модели [Гонтовая, Гордиенко, 2006 и др.]. Вызванное такими погрешностями расхождение между экспериментальным и расчетным скоростными разрезами верхней мантии должно находиться в пределах  $0,1 \pm 0,05$  км/с. Большие отклонения считались указывающими на несоответствие экспериментальных разрезов модельным, построенным по представлениям АПГ.

**Рифтовая система Восточной Африки.** В пределах Африканского континента рифтогенезу на явно континентальной коре предшествовал длительный перерыв в тектономагматической активности [Милановский, 1983 и др.], достаточный для накопления энергии, необходимой для активизации. Вероятное исключение составляет только южная часть ВАРЗ. Здесь предполагается киммерийская активизация (200—150 млн лет назад) [Восточно-Африканская..., 1974; Милановский, 1983; Olsen, 1995 и др.]. Не исключено, что именно поэтому проявления рифтогенеза на юге ослаблены по сравнению с северной частью ВАРЗ (рис. 2). Но и в этом случае



Рис. 2. Альпийский рифтогенез в Африке: а — проявления интенсивных поднятий (1), магматизма (2), активных разломов (3), как правило, обрамляющих рифтовые трюги; б — размещение эпицентров землетрясений (4), часть из которых использована при построении годографов, и сейсмостанций (5).

необходимо признать радиогенную теплогенерацию мантийных пород в регионе несколько большей, чем под средней докембрийской платформой. Косвенным подтверждением этого могут служить встречающиеся среди мантийных ксенолитов биотитовые пироксениты и глиммериты [Беляевский, 1981].

Расчет параметров магматических очагов (преимущественно в верхней мантии) привел к обычным для рифтового процесса значениям глубин их кровель и температур: 185 км и 1650 °С, 145 км и 1500 °С, 95 км и 1350 °С, 55 км и 1200 °С, 20 км и 1150 °С. В последнем случае речь идет о плавлении в очаге основной магмы, а не кислой или средней, которые тоже образуются на этой глубине, но в наших работах не изучались [Гордиенко, 2014 и др.]. Для наиболее молодых пород характерны очаги магматизма с параметрами 80—100 км и 1300—1400 °С [Беляевский, 1981 и др.]. Впрочем, есть информация, указывающая на существенно большую глубину кровли астеносферы [Kaeser et al., 2006].

По данным о возрасте базальтоидов ВАРЗ мантийный источник магматизма появился здесь около 30 млн лет назад

[Восточно-Африканская..., 1974; Ashwal, Burke, 1989 и др.]. Активный процесс в Аденском проливе, Красном море, районе Афар и, вероятно, в эфиопской части собственно ВАРЗ (до широты появления западной ветви рифтовой системы) начался несколько раньше — около 40 млн лет назад или более [Милановский, 1983].

Эти части ВАРЗ различаются еще и шириной системы. В южной между ветвями рифта появляется неактивизированный или лишь местами активизированный массив шириной до 700 км. Проявления магматизма в западной ветви рифтов намного слабее, чем в восточной. Далее предполагалось (для этого есть все основания) развитие в большей части ВАРЗ глубинных процессов по схеме континентального рифтогенеза в соответствии с представлениями АПГ [Gordienko, 2016a,b]. На крайнем юге системы возможна замена рифтогенеза одно- или двухактной активизацией, но достоверной аргументации такой точки зрения нет.

Годографы, построенные для изучаемого региона, характеризуются умеренным разбросом индивидуальных точек по сравнению с осредняющей линией (около 1,5 с)

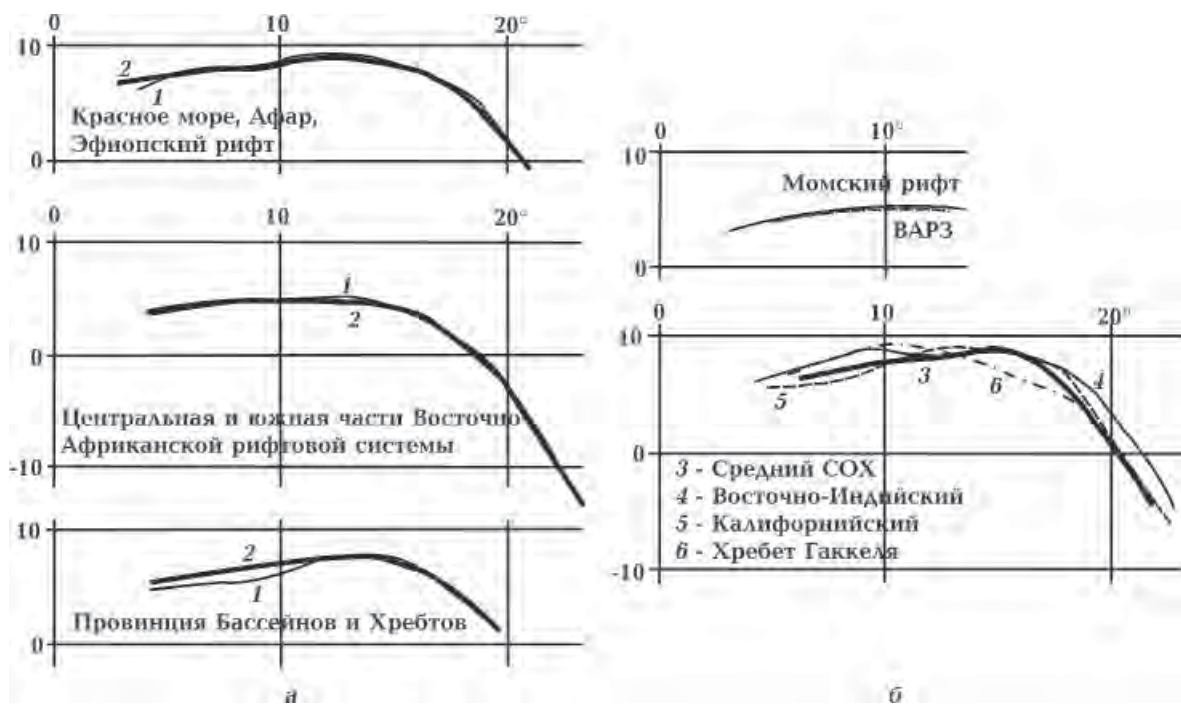


Рис. 3. Сравнение некоторых годографов для изученных регионов. а: 1 — экспериментальные, 2 — расчетные годографы; б — экспериментальные годографы для различных регионов.

и распадаются на две группы, явно отражающие различные скоростные разрезы верхней мантии. В северную группу входят данные по Аденскому проливу, Красному морю, району Афар и Эфиопскому рифту (182 значения времен пробега волн, единая глубина источников 18 км [Mooney et al., 2002 и др.]). Во вторую — вся часть ВАРЗ южнее (2618 значений, единая глубина источников 35 км).

В группах годографы близки. Лишь в одном фрагменте обнаружено отклонение около 2,5 с части годографа длиной около 3° от компактно расположенных остальных. Гистограммы различий показывают, что частные годографы отклоняются от осредняющего в среднем менее чем на 1 с. А между двумя группами обнаруживаются заметные различия. Они, в общем, ожидаемы по геологическим данным и по материалам предшествующих исследований (рис. 3, а). На рис. 3 приведены годографы и для других регионов, изучаемых в данной работе.

Подобранные скоростные разрезы

(рис. 4) отличаются от полученных ранее другими авторами в верхней и нижней третях верхней мантии более высокими значениями скорости распространения продольных сейсмических волн. В центральной трети величины  $V_p$  близки. Существенные различия фиксируются в соотношениях скоростных разрезов Красного моря, Афара и Эфиопского рифта. Согласно полученным данным они практически совпадают в пределах погрешности построений. В опубликованных ранее результатах этого не наблюдалось.

Варианты скоростных разрезов верхней мантии Африкано-Аравийской рифтовой системы представлены на рис. 4 вместе с аналогичными данными по другим изучаемым регионам.

На скоростном разрезе северной части региона выделяется интервал глубин, в пределах которого скорости соответствуют начальной стадии частичного плавления пород мантии. Можно предположить, что на глубине около 100 км располагается кровля астеносферы. Рифт Красного

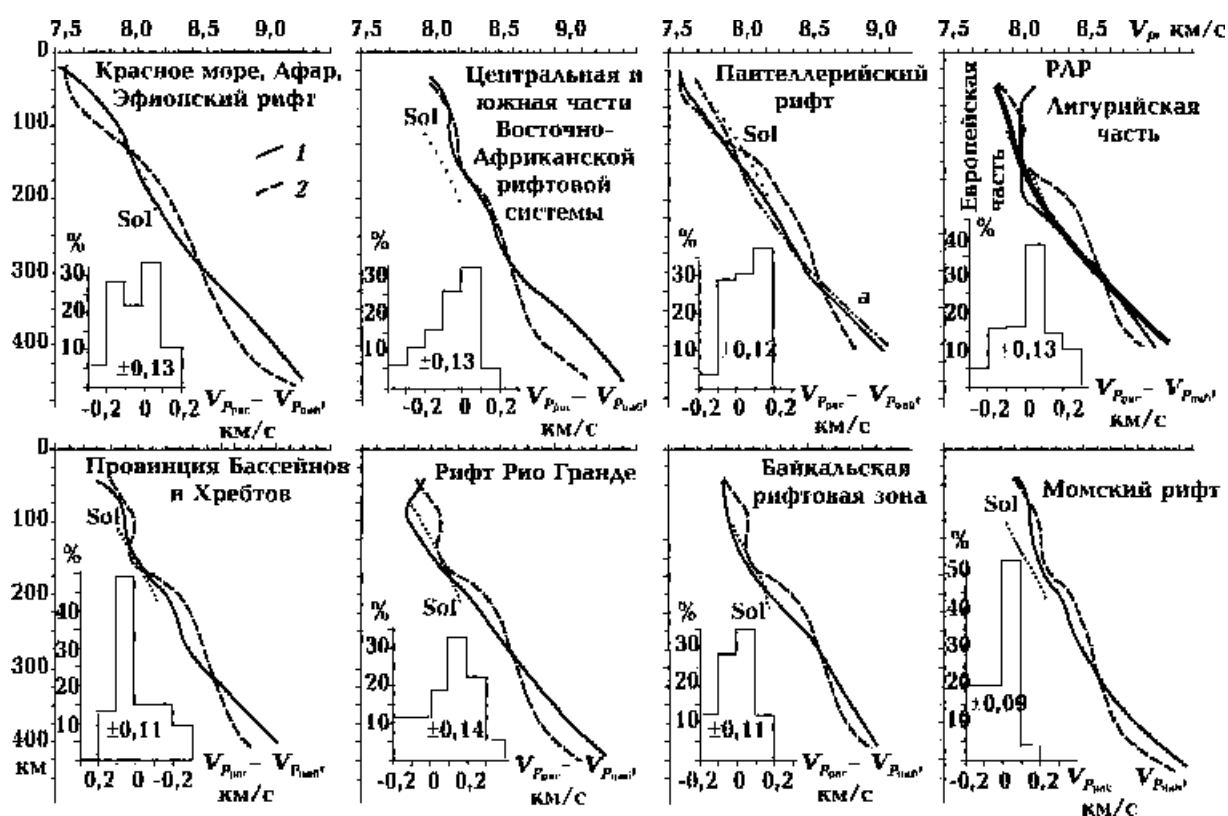


Рис. 4. Экспериментальные скоростные разрезы верхней мантии изученных регионов (1) и их расчетные варианты (2), соответствующие представлениям АПГ о глубинных процессах в тектоносфере (см. ниже). На врезке — гистограммы распределений отклонений расчетных значений скорости от экспериментальных (наблюденных). Sol — распределение  $V_p$ , соответствующее температуре плавления пород мантии. а — скоростной разрез мантии СОХ [Gordienko, Gordienko, 2016].

моря по геологическим данным нельзя напрямую соотнести с океаническим. Он образовался на континентальной коре, которая за время активного процесса переработана почти до уровня океанической в полосе шириной около 200 км [Mooney et al., 2002]. Срединно-океанический хребет (СОХ) возникает на ранее существовавшей океанической коре. Скоростные разрезы хребтов Карлсберг и Восточно-Индийского заметно не отличаются от разрезов типичных СОХ (Атлантического, Восточно-Тихоокеанского и др.) [Gordienko, Gordienko, 2016]. Поэтому разрез Красного моря был сопоставлен с экспериментальным и расчетным разрезами океанизованного региона (задугового бассейна). Достигнутое согласование удовлетворительное: среднее расхождение менее 0,1 км/с.

На втором разрезе низкие значения  $V_p$ , соответствующие астеносфере, не представлены. Но можно допустить, что это результат осреднения двух скоростных разрезов — платформенного и рифтового. В последнем астеносфера вполне может выделяться. Во всяком случае, индивидуальные скоростные разрезы для Кенийского рифта [Olsen, 1995; Mooney et al., 2002 и др.] ее обнаруживают. Подтверждением ее наличия на части территории зоны является и молодой магматизм. Таким образом, использованные данные не позволяют в достоверной форме определить скоростные разрезы рифтов в южной части изучаемой территории. Для южной части региона расчетная модель представляет собой среднее между рифтовой и платформенной. И здесь можно констатировать удовлетворительное согласование этих

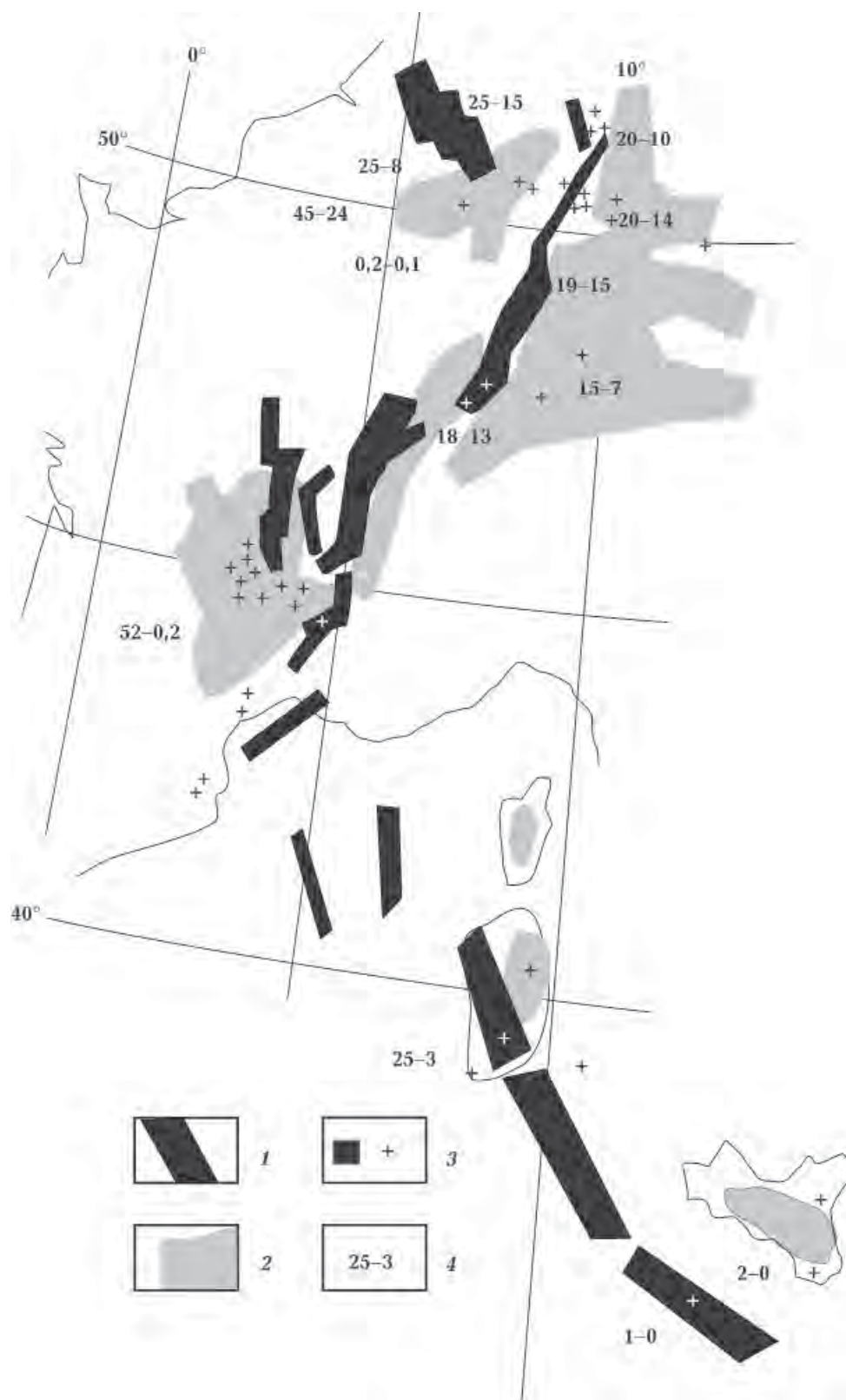


Рис. 5. Северная часть Рено-Ливийской рифтовой системы: 1 — примерные контуры рифтовых трогов, 2 — современные поднятия амплитудой более 500 м, 3 — проявления кайнозойского магматизма, 4 — возраст изверженных пород, млн лет.

независимо установленных распределений скорости сейсмических волн.

Если из всей совокупности данных по южной части ВАРЗ отобрать полученные по трассам, проходящим почти исключительно вдоль цепочки рифтов Кенийско—Грегори—Руква, получим годограф, практически совпадающий с установленным для Эфиопского рифта (естественно, при пересчете для единой глубины источников 18 км). В соответствующем такому годографу скоростном разрезе выделяется астеносфера, и в целом он близок к расчетному для альпийского континентального рифта. Невелико его отличие и от разреза под океанизированным блоком.

**Рено-Ливийская рифтовая система (РЛР)** — самый значительный в Европе регион с данным типом эндогенного режима, продолжающий развитие в настоящее время. Континентальные рифты верхнего и нижнего Рейна и Центрального массива Франции дополняются фрагментами Пантеллерийского рифта в Средиземном море на коре, приближающейся по мощности к океанической (менее 20 км). Затем рифт продолжается на Африканском континенте (см. рис. 2 и 5).

В пределах РЛР авторам не удалось провести изучение скоростного разреза верхней мантии по схеме, использованной в других регионах. Длина однородных элементов структуры недостаточна. Годографы, построенные с соблюдением требования о расположении сейсмостанций и эпицентров в рифте, получились слишком короткими для характеристики скоростного разреза за пределами подкоровой зоны мантии. Поэтому были привлечены литературные данные из различных источников, благо соответствующие территории и акватории хорошо изучены сейсмологически [Glahn et al., 1993; Olsen, 1995; Sobolev et al., 1996; Achauer, Masson, 2002; Koulakov et al., 2009; Ritter, 2011 и др.].

Данные о скоростном разрезе под Пантеллерийским рифтом выглядят довольно определенно (см. рис. 4). Они согласуются с моделью под СОХ, хотя в данном случае скорее можно было бы ожидать вариант

разреза, соответствующий океанизации. Мощность коры в районе рифта еще не достигла обычной для океанов, сложно говорить об активном процессе, наложенном на район с предварительно океанизированной корой. Тем не менее близость разрезов очевидна (они различаются на величины, вполне объяснимые погрешностями). Неплохо согласуется экспериментальный разрез и с построенным по тепловой модели (см. рис. 4).

В континентальной части системы по данным нескольких авторов построены скоростные разрезы верхней мантии для Центрального массива Франции и Рейнских грабен (включая Гессенский грабен и Эйфель). Результаты получились практически совпадающими (на рис. 4 приведена одна кривая). Следует отметить, что скоростные разрезы установлены именно для активных фрагментов системы. Между ними на трехмерной модели [Koulakov et al., 2009] видны промежуточные блоки со сравнительно высокими значениями скорости в подкоровой мантии. Они занимают около трети длины региона. При учете этого обстоятельства средняя для континентальной части системы скоростная модель мантии должна сместиться (по крайней мере, в верхней половине) в сторону заметно более высоких значений  $V_p$ . Однако уровень скорости под южной частью ВАРЗ все же не будет достигнут.

Сопоставление экспериментальной модели с рассчитанной по тепловой для континентального рифта обнаруживает достаточно приемлемое согласование разрезов (см. рис. 4).

Под активными континентальными частями рифтовых систем ВАРЗ, РЛР и ПБХ, Байкальской рифтовой зоны и, возможно, Момского рифта отмечена сокращенная по сравнению с окружающими регионами мощность земной коры. Это серьезная причина для предположения о погружении в процессе океанизации коры эклогитов в мантию. Эклогитовые блоки обладают повышенными значениями скорости продольных сейсмических волн, которые не учитываются моделью, базирующейся на

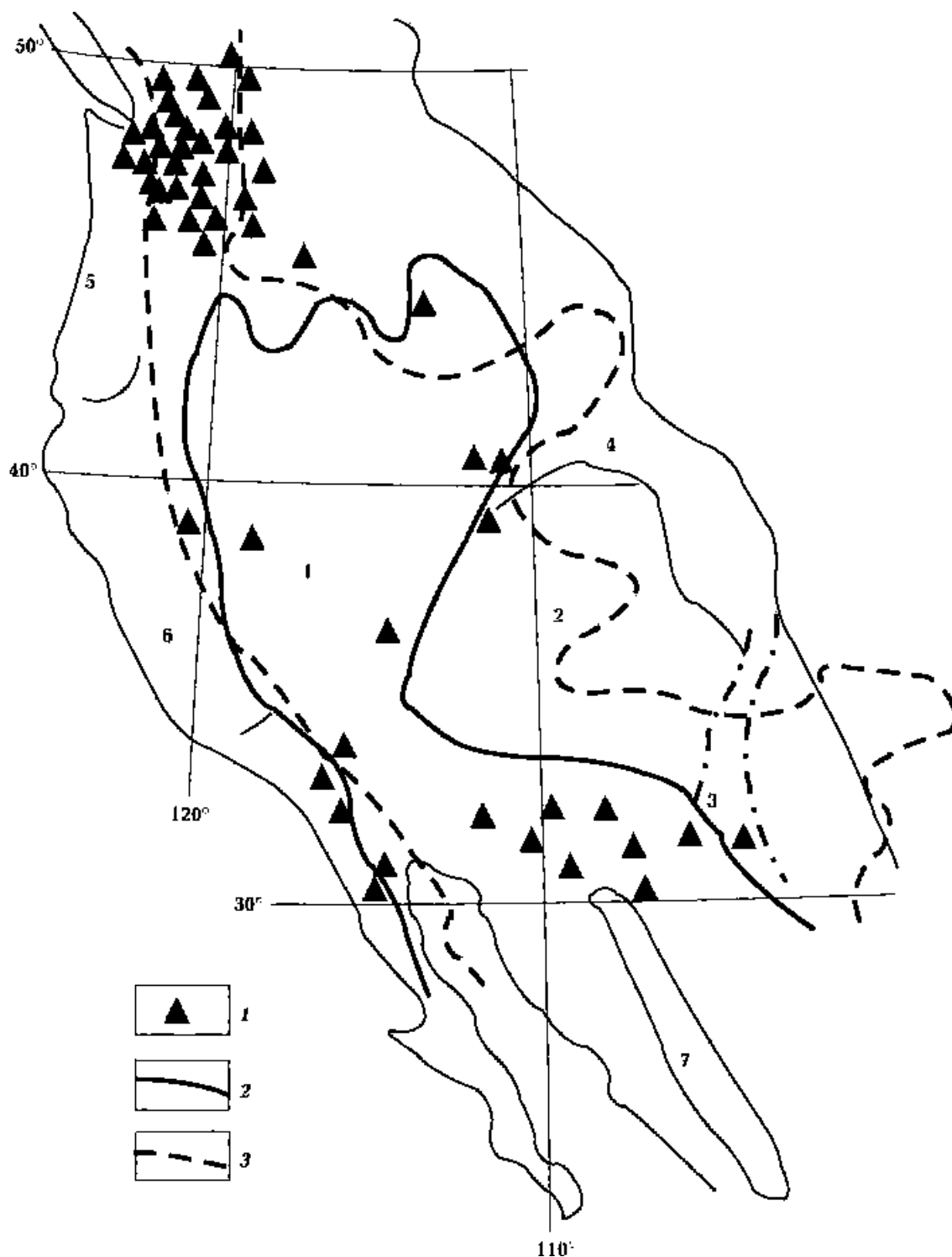


Рис. 6. Размещение сейсмостанций в провинции Бассейнов и Хребтов: 1 — сейсмостанции, 2 — контуры территории со структурными формами ПБХ, 3 — контуры территории распространения молодого бимодального магматизма. Цифры на карте: 1 — ПБХ, 2 — плато Колорадо, 3 — рифт Рио Гранде, 4 — Скалистые горы, 5 — Каскадные горы, 6 — Сьерра-Невада, 7 — Сьерра-Мадре.

тепловой. В реальной картине сравнения экспериментального и расчетного разрезов

такое противоречие отсутствует. Достигнутая к настоящему времени глубина по-

гружения эклогитов не превышает 100 км [Gordienko, 2016a] в регионах современной активизации. В альпийских рифтах от момента образования коровых эклогитов прошли десятки млн лет. Высокоскоростные блоки успели опуститься до глубин, где их плотность совпадает с фоновой — глубже 200 км. Поэтому положительные скоростные аномалии на подкоровых глубинах отсутствуют.

**Провинция Бассейнов и Хребтов Кордильер Северной Америки и рифт Рио Гранде.** На юге провинция непосредственно продолжается рифтом Калифорнийского залива. При его изучении авторами в работе [Gordienko, Gordienko, 2016] был обнаружен скоростной разрез, согласующийся с характерным для СОХ. В этом исследовании весь материал был дополнен данными по трем сейсмостанциям, расположенным у северного окончания залива (рис. 6). Всего при построении годографа использовано около 1000 значений времени пробега волн. В результате построенный ранее годограф практически не изменился, т. е. экспериментальный скоростной разрез подтверждается.

Геологическая история ПБХ изучена довольно подробно [Кинг, 1961; Милановский, 1983; Магматические..., 1987; Olsen, 1995 и др.] и не оставляет сомнений в типе действующего на этой территории эндогенного режима. Этапы магматической активности региона показаны на рис. 1. Перед активизацией большая часть его достаточно долго пребывала в состоянии «тектономагматического покоя» для достижения в верхней мантии теплового режима, близкого к платформенному, с некоторой поправкой, вероятно, на несколько повышенную радиогенную теплогенерацию. Начавшаяся в неогене активизация охватила и районы Северо-Американской платформы, расположенные восточнее ПБХ, но именно в пределах рассматриваемого региона она приобрела явные черты рифтогенеза. Это выразилось прежде всего в распространении своеобразных структурных форм, которым провинция обязана своим названием.

В пределах ПБХ ранее проведена значительная работа по изучению скоростного разреза верхней мантии [Walck, 1985; Olsen, 1995 и др.]. Построено несколько моделей, характеризующих северную, центральную и южную части региона. Они различаются между собой в степени, которая вполне может быть объяснена погрешностью построений, и согласуются с полученными авторами за исключением самой верхней подкоровой части.

При исследовании ПБХ в данной работе использовались около 2500 значений времени пробега сейсмических волн к сейсмостанциям, показанным на рис. 6, расположенным во всех частях региона. Единая глубина источников — 35 км [Olsen, 1995; Mooney et al., 2002 и др.]. Отклонения индивидуальных точек от осредняющей кривой находятся в обычных пределах, ни в одном из случаев построения частных годографов не превышают в среднем 2 с. Различия между годографами также не больше обычных величин. Вполне может быть построен сводный годограф, характеризующий регион в целом. Полученный материал позволяет построение скоростного разреза до глубины около 400 км.

На рис. 4 приведен сводный годограф и его сопоставление с рассчитанным. Таким образом, и в рассмотренной провинции экспериментальные данные о скоростном разрезе можно с приемлемой точностью объяснить как следствие глубинного процесса континентального рифтогенеза по АПГ. При переходе к океанической коре (даже к сравнительно узкой ее полосе в Калифорнийском заливе) скоростной разрез верхней мантии практически полностью согласуется с разрезом СОХ. Смена разрезов происходит вместе со сменой типа земной коры.

Располагающийся сравнительно недалеко от ПБХ довольно протяженный (около 1100 км) рифт Рио Гранде (см. рис. 6) не позволяет провести исследование применяемым методом на всю глубину верхней мантии. Используются литературные данные (см. рис. 4).

Геологическая история рифта близка



к истории ПБХ, периоды магматической активности примерно совпадают. Различие состоит в несколько более щелочном (андезито-базальтовом) характере первого этапа магматизма с большим преобладанием продукции коровых очагов [Милановский, 1983; Olsen, 1995].

Расчетная скоростная модель [Achaue, Masson, 2002; Olsen, 1995 и др.] удовлетворительно согласуется с экспериментальной (см. рис. 4) для случая континентального рифтогенеза. Рифт Рио Гранде формально не подпадает под определение «континентальный, связанный с океаническим», которое выбрано авторами для исследования. Предположения о его связи с рифтом Калифорнийского залива высказывались, но пока не находят подтверждения.

**Байкальская рифтовая зона (БРЗ).** В сущности, о ней можно сказать то же самое. К настоящему времени не обнаружено следов рифтогенеза между ее восточным окончанием и Момским рифтом (который контактирует с океаническим хребтом Гаккеля). Тем не менее нет смысла отказываться от привлечения данных по этому весьма протяженному и активному объекту.

Геологическая история БРЗ близка к установленной в рассмотренных выше регионах. Проявления преимущественно базальтового магматизма [Хаин, 1979; Милановский, 1983; Olsen, 1995; Грачев, 1996 и др.] датированы 35—40 млн лет, около 25 млн лет назад появляются трахибазальты, погружающийся грабен обрамляют горные поднятия, интенсивность магматизма последней стадии сокращается только около 1 млн лет назад. Состав пород согласуется с глубинами очагов частичного плавления, установленных по представлениям АПГ для разных этапов эволюции континентального рифта.

Из-за резких изменений простирания БРЗ авторам удалось в разных частях зоны построить только небольшой начальный фрагмент экспериментального годографа (до углового расстояния около  $8^\circ$ ), используя примерно 800 значений времен пробега волн. При попытках удлинить го-

дограф часть траекторий оказывалась вне рифта, что могло привести к искажению результата.

Сейсмологические исследования Байкала и прилегающих регионов проводились неоднократно, имеются и обобщения их результатов, например, работа [Мордвинова и др., 2016]. Данные разных авторов оказываются весьма противоречивыми вплоть до фиксации в одном интервале глубин аномалий разных знаков. В частности, это касается и подкоровых глубин, к которым относится построенный авторами данной статьи отрезок годографа. Он, несомненно, указывает на отрицательную скоростную аномалию под корой. Поэтому из имеющихся разрезов был выбран полученный в работах [Zhao et al., 2006; Жао и др., 2010], начинающийся вверху с такой же аномалии (см. рис. 4).

Очевидно, построенное распределение скоростей сейсмических волн в мантии согласуется с полученными под другими континентальными рифтами. То же можно сказать и о его согласовании с расчетным разрезом. Степень совпадения и здесь укладывается в оговоренные выше рамки, обусловленные погрешностями построений.

**Хребет Гаккеля и Момский рифт.** Геолого-геофизические исследования последних десятилетий уже дают возможность в основных чертах описать геологическую историю этого региона [Хаин, 1979; Грамберг и др., 1990; Грачев, 1996; Драчев 2000; Буценко, 2006; Андиева, 2008; Никишин и др., 2017 и др.], хотя полное согласование мнений различных исследователей еще не достигнуто. Но для решения нашей задачи эти расхождения не имеют значения.

Океаническая кора, окружающая хребет Гаккеля, сформировалась около 130—150 млн лет назад, рифтогенез в районе хребта начался 50—60 млн лет назад. На большей части континентального фрагмента системы происходил геосинклинальный процесс (в период 320—100 млн лет назад). Рифтогенез на континенте стартовал около 70 млн лет назад, т. е. рань-

ше, чем в рассмотренных выше случаях. Однако активные события в тектоносфере продолжаются до настоящего времени.

Расположение сформировавшихся структур представлено на рис. 7.

На шельфе изучена сложная система трогов и поднятий, заполняющая всю выделенную на рис. 7 полосу. Ситуация на-

поминает существующую в ПБХ. На суше информация менее детальна, но можно предположить наличие примерно таких же структурных форм. Магматизм региона изучен недостаточно. Известны базальты и липариты, возраст базальтового вулкана Балаган-Тас предположительно составляет несколько сотен лет. Другими словами,

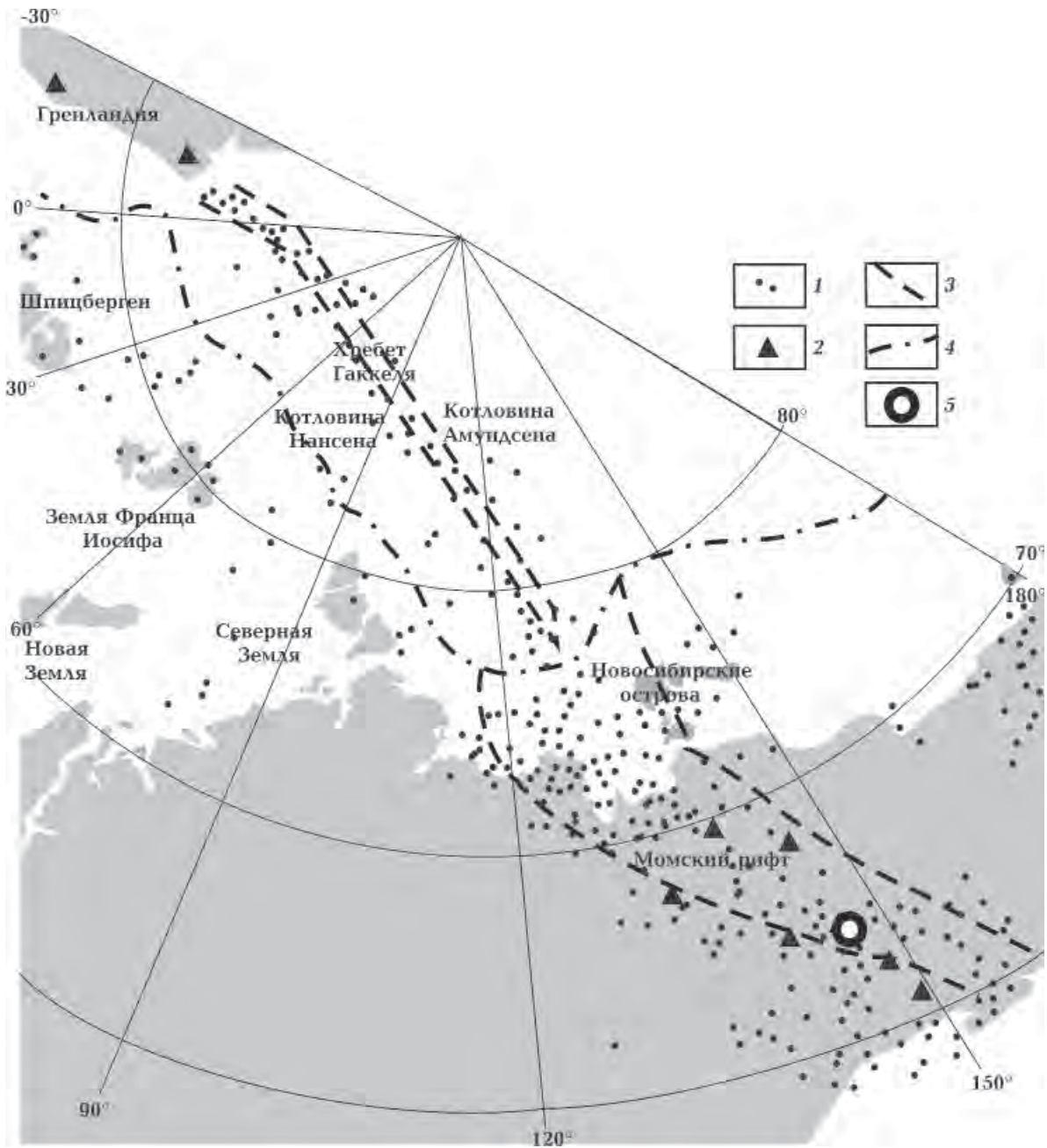


Рис. 7. Полоса эпицентров землетрясений от Гренландии до Охотского моря. 1 — эпицентры, 2 — сейсмостанции, данные по которым использованы для построения годографов, 3 — примерные контуры зон рифтогенеза, 4 — границы шельфа, 5 — проявления магматизма.

на глубине порядка 100 км до настоящего времени находится очаг частичного плавления. Примерно в то же время должен образовываться и расплав в центральной или верхней части коры.

В пределах Момского рифта не удалось построить годограф протяженностью, обеспечивающей освещение всей верхней мантии. Хотя достигнута почти максимальная возможная длина (13°, около 250 значений времен пробега волн (см. рис. 3 и 7), единая глубина источников — 35 км), лучи проникают лишь на глубину не более 200 км. Годограф практически полностью совпадает с полученным для центральной и южной частей ВАРЗ. Можно предположить, что его форма тоже связана с включением в состав изучаемого региона кроме собственно рифтов еще и значительных фрагментов докембрийской платформы. Однако это не соответствует геологическим данным — таких фрагментов в составе Момского рифта нет или мало. Причина получения годографа, соответствующего сравнительно высокоскоростной верхней мантии, в незначительности временного интервала между рифтогенезом и предшествующей киммерийской геосинклиналью.

При построении тепловой модели для момента окончания геосинклинального теплопереноса и еще через 30 млн лет обнаруживается, что в нижней части верхней мантии не успела сформироваться достаточно мощная астеносфера для обеспечения трех актов теплопереноса (полного цикла рифтогенеза). Возможен процесс, включающий только два акта. Соответственно зона перегрева и частичного плавления в верхней части мантии сокращается по сравнению с обычным континентальным рифтом. Ситуацию несколько «исправляет» повышенная радиогенная теплогенерация, но ее оказывается недостаточно для сближения скоростных разрезов Момского и типичного рифта. Впрочем, для молодого магматизма условия сохраняются. Тепловая модель примерно сходна со средней на рис. 1. Различия связаны в основном с повышенными начальными

температурами, обусловленными более высокой радиогенной теплогенерацией пород мантии в районе фанерозойской геосинклинали. Кроме того, не исключено, что эти различия в данном случае незначительны, так как регион входит в крупную провинцию Северной Азии с аномально основной корой. И именно такая кора могла сыграть дополнительную роль в повышении средних значений скорости в подкоровой мантии. Речь идет о большем, чем в обычной коре, образовании эклогитов, опустившихся в мантию. Но, как отмечено выше, эти образования в настоящее время располагаются достаточно глубоко, чтобы не изменять скоростной разрез на глубинах менее 200 км.

Ранее в регионе была построена скоростная модель по  $P$ -волнам [Жао и др., 2010], незначительно отличающаяся от полученной нами под ВАРЗ в сторону понижения  $V_p$ . Заметные отклонения обнаруживаются только в самой нижней части модели (300—400 км), т. е. за пределами глубин, где формируются сравниваемые годографы (см. рис. 3, б). Такой вариант разреза несколько лучше согласуется с расчетным. Согласование экспериментального разреза под Момским рифтом с расчетным (для описанного выше варианта процесса) удовлетворительное (см. рис. 4).

Годограф для хребта Гаккеля построен с использованием данных о землетрясениях (около 100 значений времен пробега волн, единая глубина источников 10 км) практически по всей длине структуры на угловых расстояниях до 22°. Он принципиально не отличается от годографов для типичных СОХ (см. рис. 3, б) [Гордиенко и др., 2016а; Gordienko, Gordienko, 2016].

**Обсуждение результатов.** Представляет интерес совместное рассмотрение всех полученных данных для молодых континентальных и океанических рифтов. В первом случае из обобщения исключены модели под центральной и южной частями ВАРЗ и под Момским рифтом как отражающие смешанные условия формирования скоростных разрезов. Для оставшихся пяти кривых рассчитана средняя и определе-

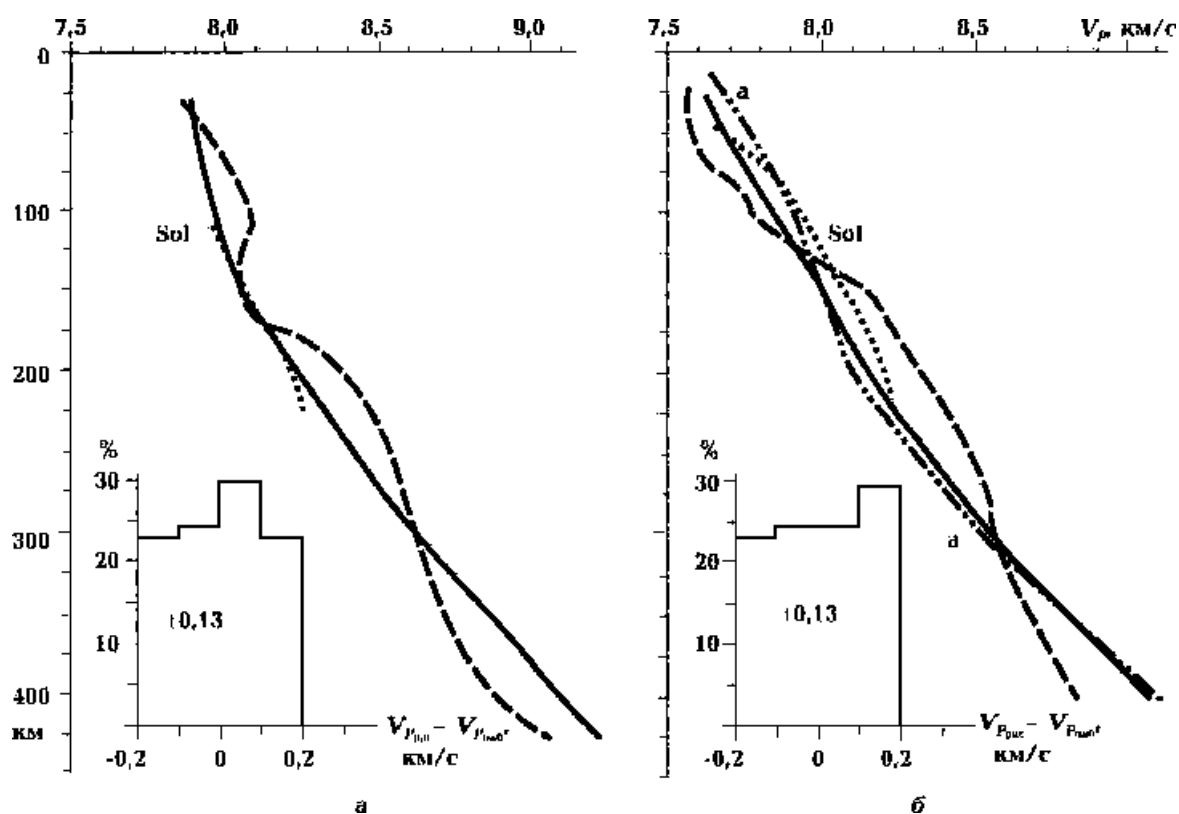


Рис. 8. Средние скоростные модели: *а* — альпийского континентального рифта, *б* — СОХ, сочленяющегося с континентальным рифтом. Усл. обозначения см. на рис. 4.

ны отклонения от нее частных вариантов (~0,05 км/с), т. е. вариации не столь значительны, как можно было бы ожидать при использовании столь разнородной информации (см. выше). Можно констатировать, что построен типичный скоростной разрез мантии под альпийским континентальным рифтом.

Сопоставление этого разреза с расчетным по АПГ приводит к такому же среднему отклонению, как и для индивидуальных моделей — 0,13 км/с (рис. 8).

Такой же результат получен и для изученных СОХ, сочленяющихся с континентальными рифтами. Отклонения индивидуальных моделей от средней составляют ±0,05 км/с, средняя модель отличается от установленной для всех СОХ [Gordienko, Gordienko, 2016] на ±0,04 км/с, от расчетной модели — на ±0,13 км/с (см. рис. 8). Отличия изученных скоростных разрезов СОХ от всех остальных незначительны, они не выходят за пределы вариаций раз-

резов, полученных под хребтами в разных океанах далеко от континентов.

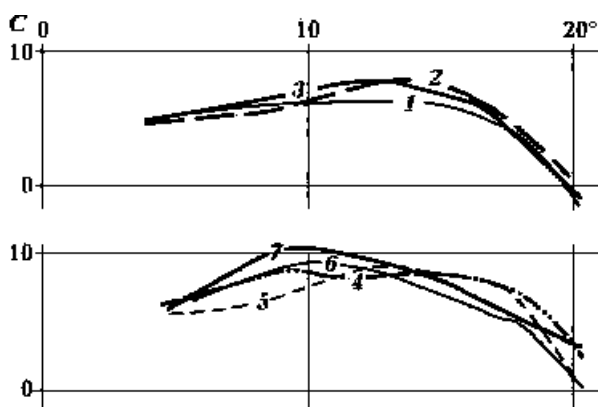


Рис. 9. Сопоставление экспериментальных годографов континентальных рифтов и СОХ с рассчитанными для скоростных разрезов этих регионов по АПГ. Континентальные рифты: 1 — Кенийский рифт, 2 — ПБХ, 3 — по АПГ, СОХ; 4 — Восточно-Индийский, 5 — Калифорнийского залива, 6 — хр. Гаккеля, 7 — по АПГ.

Экспериментальные и расчетные скоростные разрезы мантии регионов с обоими типами эндогенного режима согласуются в пределах погрешности, тем не менее расхождения на отдельных глубинах довольно значительны (до 0,2 км/с) и сохраняют знак в значительных интервалах глубин. Сокращение разницы между разрезами рифтов, например, в интервале глубин 150—250 км за счет изменения тепловой модели совершенно нереально. Необходимое значение  $\Delta V_p$  требует перегрева на 300 °С, что не может быть согласовано с энергетическим балансом тектоносферы. Скорее всего, речь идет об определенной эквивалентности аномалий разного знака.

Можно предложить еще один вид сопоставления — по виду годографов, который позволяет оценить эквивалентность сравниваемых разрезов с этой точки зрения. Результаты представлены на рис. 9, где приведены экспериментальные годографы для континентальных рифтов, полученные в данной работе, с годографом, вычисленным по скоростному разрезу, соответствующему АПГ. То же проделано и для СОХ.

В первом случае годографы довольно близки. Сравнение расчетного по АПГ со средним из двух экспериментальных обнаруживает среднюю величину расхождения 0,5 с. Такое же значение получаем и при сопоставлении друг с другом экспериментальных годографов. Вероятно, большего согласования требовать нельзя, а наблюдаемые расхождения скоростных разрезов на рис. 4 находятся в рамках эквивалентности решения задачи.

Для СОХ ситуация сложнее. Расхождение между расчетным годографом по АПГ и средним из экспериментальных составляет 1 с, между экспериментальными — 1,5 с. Скорее всего, существуют реальные заметные различия между скоростными разрезами различных СОХ. В этом можно убедиться, сравнивая экспериментальные годографы для этих структур по разным

океанам и разным частям протяженных СОХ. Наблюдаются различия, вполне сопоставимые с отмеченными выше на рис. 9 [Gordienko, Gordienko, 2016].

**Выводы.** Проведенные исследования альпийских континентальных рифтов, часть из которых контактирует с СОХ, позволили прийти к таким результатам.

1. Обнаружены близкие скоростные разрезы верхней мантии под континентальными рифтами. Значащие отклонения в значениях  $V_p$  установлены только в случаях, когда построенный разрез характеризует не только рифтовую систему, но и фрагменты докембрийской платформы, или когда процесс рифтогенеза отличается от типичного по причине необычной предыстории региона.

2. Скоростные разрезы континентальных рифтов несколько отличаются от разрезов СОХ в сторону больших значений скорости (пониженных температур) практически во всем диапазоне глубин верхней мантии. Для нижних горизонтов верхней мантии этот результат не прогнозируется АПГ и заслуживает специального рассмотрения.

3. Оба варианта скоростного разреза (и разрез под океанизируемым регионом) согласуются с построенными по тепловым моделям верхней мантии, отражающими глубинные процессы в тектоносфере по схеме АПГ. Различия не превышают обусловленных реальными погрешностями расчетов.

4. В то же время различия в экспериментальных и расчетных разрезах мантии под регионами с тремя типами эндогенных режимов достаточно близки. Необходимо констатировать, что погрешности построения моделей и естественные вариации скорости делают практически невозможным определение принадлежности изучаемого региона к тому или иному типу из рассмотренных режимов по виду скоростного разреза.

Список литературы

- Андиева Т. А. Тектоническая позиция и основные структуры моря Лаптевых. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008. Т. 3. № 1. С. 1—28.
- Беляевский Н. А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. Москва: Недра, 1981. 432 с.
- Буценко В. В. Сейсмостратиграфическая датировка главных тектонических событий в Арктическом океане. *Геофиз. вестник*. 2006. № 11. С. 8—16.
- Восточно-Африканская рифтовая система. Т. III. Ред. В. В. Белоусов. Москва: Наука, 1974. 288 с.
- Геншафт Ю. С., Салтыковский А. Я. Кайнозойский вулканизм Монголии. *Российский журнал наук о Земле (электронная версия)*. 2000. Т. 2. № 2. <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v02/rje00038/rje00038.htm>.
- Гибшер А. А. Состав и строение ордовикской литосферной мантии Западного Сангилен (Центрально-Азиатский складчатый пояс) по данным изучения мантийных ксенолитов из камптонитовых даек Агардагского щелочно-базальтоидного комплекса: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: НГУ, 2009. 24 с.
- Глебовицкий В. А., Никитина Л. П., Хильтова В. Я. Термальное состояние мантии, подстилающей докембрийские и фанерозойские структуры (по данным гранат-ортопироксеновой термобарометрии ксенолитов гранатовых перидотитов в кимберлитах и щелочных базальтах). *Физика Земли*. 2001. № 3. С. 3—25.
- Глебовицкий В. А., Никитина Л. П., Хильтова В. Я. Термальные режимы в нижней коре (по данным гранат-ортопироксеновой термобарометрии нижнекорковых ксенолитов в кимберлитах и щелочных базальтах). *Физика Земли*. 2003. № 12. С. 72—87.
- Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В. Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2006. № 2. С. 107—121.
- Гордиенко В. В. О РТ-условиях в магматических очагах мантии Земли. *Геофиз. журн*. 2014. Т. 36. № 6. С. 28—57.
- Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я. Скоростная модель верхней мантии под островными дугами и береговыми хребтами Тихого океана. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2015. № 3. С. 69—81.
- Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я. Скоростная модель верхней мантии под срединноокеаническими хребтами. *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. 2016а. № 1. С. 33—42.
- Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я. Скоростной разрез верхней мантии под Алеутской, Курильской и Японской островными дугами. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2012. № 3. С. 37—46.
- Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я. Скоростные разрезы верхней мантии океанических желобов. *Доп. НАН Украины*. 2016б. № 4. С. 62—68.
- Грамберг И. С., Деменицкая Р. М., Секретов С. Б. Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающего звена рифтового пояса хребта Гаккеля—Момского рифта. *Докл. АН СССР*. 1990. № 3. С. 689—694.
- Грачев А. Ф. Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики северной Евразии. *Физика Земли*. 1996. № 12. С. 5—36.
- Драчев С. С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых. *Геотектоника*. 2000. № 6. С. 43—58.
- Жао Д., Пирайно Ф., Луу А. Структура и динамика мантии под восточной Россией и прилегающими регионами. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1188—1203.
- Кинг Ф. Геологическое развитие Северной Америки. Москва: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 301 с.
- Магматические горные породы. Т. 4. Кислые и средние горные породы. Ред. В. В. Ярмолюк, В. И. Коваленко. Москва: Наука, 1987. 375 с.

- Милановский Е. Е. Рифтогенез в истории Земли. Москва: Недра, 1983. 280 с.
- Милановский Е. Е., Короновский Н. В. Орогенный вулканизм и тектоника Альпийского пояса Евразии. Москва: Недра, 1973. 279 с.
- Мордвинова В. В., Кобелев М. М., Трусов А. В., Хритова М. А., Кобелева Е. А., Лухнева О. Ф. Глубинное строение переходной зоны Сибирская платформа—Центрально-Азиатский подвижный пояс по телесеismicким данным. *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. № 1. С. 85—103.
- Назарова З. А., Дроздина С. Я., Сеньюков С. Л., Дроздин Д. В. Определение положения очагов землетрясений Камчатского региона. В кн.: *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ДВО РАН, 2010. С. 363—366.
- Никишин А. М., Петров Е. И., Малышев Н. А. Тектоническое строение и геологическая история Арктического океана в мезозое и кайнозое: *Материалы XLIX тектонического совещания*. Т. 2. Москва: ГЕОС. 2017. С. 37—39.
- Отчет «Разработка научных основ комплексной системы мониторинга сейсмоактивности в Курило-Камчатском районе». Рук. Л. И. Лобковский. Москва: ИО РАН, 2008. 95 с.
- Салтыкова А. К. Вещественный состав, термальное и окислительно-восстановительное состояние верхней мантии Байкало-Монгольского региона: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург: Изд. СПбГУ, 2008. 23 с.
- Тараканов Р. З. Скоростные модели и годографы Р-волн для Дальневосточного региона. *Вестник ДВО РАН*. 2006. № 1. С. 81—95.
- Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Внеальпийская Азия и Австралия. Москва: Недра, 1979. 357 с.
- Achauer U., Masson F., 2002. Seismic tomography of continental rifts revisited: from relative to absolute heterogeneities. *Tectonophysics* 358(1-4), 17—37. doi: 10.1016/S0040-1951(02)00415-8.
- Ashwal L., Burke K., 1989. African lithospheric structure, volcanism and topography. *Earth Planet Sci. Lett.* 96, 8—14.
- Feng M., Lee S., Assumpcao M., 2007. Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental mode group velocities of Rayleigh waves. *J. Geophys. Res.* 112. B04312. doi: 10.1029/2006JB004449.
- Glahn A., Granet M. and the Rhine Graben Teleseismic Group, 1993. Southern Rhine Graben: small-wavelength tomographic study and implications for the dynamic evolution of the graben. *Geophys. J. Int.* 113, 399—418.
- Gordienko V., 2016a. Deep-seated processes in the tectonosphere of continental rifts. *NCGT Journal* (3), 361—388.
- Gordienko V., 2016b. Deep-seated processes in the tectonosphere of oceans. *NCGT Journal* (4), 553—581.
- Gordienko L., Gordienko V., 2016. P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal* (3), 389—405.
- Kaesar B., Kalt A., Pettke T., 2006. Evolution of the lithospheric mantle beneath the Marsabit volcanic field (Northern Kenya): Constraints for textural, PT and geochemical studies on xenoliths. *J. Petrol.* 47(11), 2149—2184. doi:10.1093/petrology/egl040.
- Koulakov I., Kaban K, Tesauro M., Cloetingh S., 2009., P- and S-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophys. J. Int.* 179, 345—366. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04279.x.
- Koulakov I., Bushenkova N., Burov E., Cloetingh S., El Khrepy S., Al-Arifi N., 2016. Evidence for anomalous mantle upwelling beneath the Arabian Platform from travel time tomography inversion. *Tectonophysics* 667, 176—188. doi: 10.1016/j.tecto.2015.11.022.
- Mooney W., Prodehl C., Pavlenkova N., 2002. Seismic velocity structure of the continental lithosphere from controlled source data. *International handbook of earthquake and engineering seismology*. V. 81a. P. 887—910.
- Nixon P. (ed.), 1983. *Mantle Xenoliths*. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd., 820 p.
- Olsen K. (ed.), 1995. *Continental Rifts: Evolution, Structure and Tectonics*. Amsterdam, Elsevier, 492 p.
- Ritter J., 2011. A mantle plume below the Eifel volcanic fields, Germany. *Earth Planet. Sci.*

- Lett.* 186(1), 7—14. doi:10.1016/S0012821X(01)00226-6.
- Sobolev S., Zeyen H., Stoll G., Werling F., Altherr R., Fuchs K.*, 1996. Upper mantle temperatures from teleseismic tomography of the French Massif Central. *Earth Planet. Sci. Lett.* 139, 147—163. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00238-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00238-8).
- Walck M.*, 1985. The upper mantle beneath the north-east Pacific rim: a comparison with Gulf of California. *Geoph. J. Roy. Astron. Soc.* 81, 243—276.
- Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada Y., Gao S.*, 2006. Deep structure and origin of the Baikal rift zone. *Earth Planet. Sci. Lett.* 243, 681—691. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.033.

## Velocity models of the upper mantle of the continental and oceanic rifts

© V. V. Gordienko, L. Ya. Gordienko, 2017

The 1-D velocity models of longitudinal seismic waves distribution for the upper mantle of the continent rift systems which directly border with the mid-oceanic ridges (MOR) are constructed. A difference in the models between the named types of structures is established. Near the continents (but located on the oceanic crust) MOR velocity sections do not practically differ from those established on the oceans. The maximum speed anomalies are presented here. Under continental rift systems, the anomaly is less, in some cases because of the presence of arrays not covered by rifting processes within them, or the processes take place at untypical conditions. Velocity models corresponding to schemes of deep-seated processes on the advection-polymorphic hypothesis are constructed. Their comparison with experimental data (in part, according to the literature data) has been carried out. Their consistency is established.

**Key words:** continents, oceans, upper mantle, velocity models, deep-seated processes.

### References

- Andiyeva T. A.*, 2008. Tectonic position and the basic structure of the Laptev Sea. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* 3(1), 1—28 (in Russian).
- Belyaevsky N. A.*, 1981. The structure of the Earth's continental crust according to geological and geophysical data. Moscow: Nedra. 432 p. (in Russian).
- Butsenko V. V.*, 2006. Seismostratigraphic dating of the main tectonic events in the Arctic Ocean. *Geofizicheskiy vestnik* (11), 8—16 (in Russian).
- East African rift system, 1974. Vol. III. Ed. V. V. Belousov. Moscow: Nauka, 288 p. (in Russian).
- Genshaft Yu. S., Saltykovsky A. Ya.*, 2000. Cenozoic volcanism of Mongolia. *Russian Journal of Earth Sciences* 2(2), <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v02/rje00038/rje00038.htm> (in Russian).
- Gibscher A. A.*, 2009. The composition and structure of the Ordovician lithospheric mantle of Western Sangilen (Central Asian folded belt) according to the data on the study of mantle xenoliths from the camptonite dikes of the Agardag alkaline-basaltoid complex: Author's abstract. dis. cand. geol.-min. sci. Novosibirsk: NSU, 24 p. (in Russian).
- Glebovitsky V. A., Nikitina L. P., Khiltova V. Ya.*, 2001. Thermal state of the mantle underlying the Precambrian and Phanerozoic structures (according to garnet-orthopyroxene thermobarometry of xenoliths of garnet peridotites in kimberlites and alkaline basalts). *Fizika Zemli* (3), 3—25 (in Russian).
- Glebovitsky V. A., Nikitina L. P., Khiltova V. Ya.*, 2003. Thermal regimes in the lower crust from garnet-orthopyroxene thermobarometry of lower crust xenoliths in kimberlites and alka-



- line basalts. *Fizika Zemli* (12), 72—87 (in Russian).
- Gontovaya L. I., Gordienko V. V., 2006. Deep processes and geophysical models of the mantle of Eastern Kamchatka and Kronotskii Bay. *Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana* (2), 107—121 (in Russian).
- Gordienko V. V., 2014. About PT conditions in magmatic foci of the Earth's mantle. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(6), 28—57 (in Russian).
- Gordienko V. V., Gordienko L. Ya., 2015. Velocity model of the upper mantle under the island arcs and coast ridges of the Pacific Ocean. *Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana* (3), 69—81 (in Russian).
- Gordienko V. V., Gordienko L. Ya., 2016a. Velocity model of the upper mantle under the mid-ocean ridges. *Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana* (1), 33—42 (in Russian).
- Gordienko V. V., Gordienko L. Ya., 2012. Velocity section for the upper mantle beneath the Aleutian, Kurile and Japanese island arcs. *Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana* (3), 37—46 (in Russian).
- Gordienko V. V., Gordienko L. Ya., 2016b. Velocity profiles for the upper mantle beneath oceanic trenches. *Dopovidi: NAN Ukrainy* (4), 62—68 (in Russian).
- Gramberg I. S., Demenitskaya R. M., Secretov S. B., 1990. The system of riftogenic grabens of the Laptev Sea shelf as a missing link in the rift belt of the Gakkel—Mom rift ridge. *Doklady AN SSSR* (3), 689—694 (in Russian).
- Grachev A. F., 1996. The main problems of the newest tectonics and geodynamics of northern Eurasia. *Fizika Zemli* (12), 5—36 (in Russian).
- Drachev S. S., 2000. Tectonics of the rift system of the Laptev Sea bed. *Geotektonika* (6), 43—58 (in Russian).
- Zhao D., Piraino F., Liu L., 2010. Structure and Dynamics of the Mantle under Eastern Russia and Adjacent Regions. *Geologiya i geofizika* 51(9), 1188—1203 (in Russian).
- King F., 1961. Geological development of North America. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 301 p. (in Russian).
- Magmatic rocks. Vol. 4. Acidic and medium-sized rocks, 1987. Ed. V. V. Yarmolyuk, V. I. Kovalenko. Moscow: Nauka, 375 p. (in Russian).
- Milanovskiy E. E., 1983. Riftogenesis in the history of the Earth. Moscow: Nedra, 280 p. (in Russian).
- Milanovskiy E. E., Koronovskiy N. V., 1973. Orogenic volcanism and tectonics of the Alpine belt of Eurasia. Moscow: Nedra, 279 p. (in Russian).
- Mordvinova V. V., Kobelev M. M., Trusov A. V., Khritova M. A., Kobeleva E. A., Lukhneva O. F., 2016. The deep structure of the transition zone the Siberian Platform—the Central Asian mobile belt according to teleseismic data. *Geodinamika i tektonofizika* (1), 85—103 (in Russian).
- Nazarova Z. A., Droznina S. Ya., Senyukov S. L., Droznin D. V., 2010. Determination of the earthquake hypocenters in Kamchatka region. In: *Problems of complex geophysical monitoring the Russian Far East*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publishing house FEB RAS, P. 363—366 (in Russian).
- Nikishin A. M., Petrov E. I., Malyshev N. A., 2017. Tectonic structure and geological history of the Arctic Ocean in the Mesozoic and Cenozoic. *Materials XLIX tectonic meeting*. Vol. 2. Moscow: GEOS, P. 37—39 (in Russian).
- Report «Development of scientific bases for complex seismic monitoring system in the Kuril-Kamchatka region», 2008. Chief L. I. Lobkovskiy. Moscow: IO RAS, 95 p. (in Russian).
- Saltykova A. K., 2008. Material composition, thermal and oxidation-reduction state of the upper mantle of the Baikal-Mongolian region. Author's abstract. dis. cand. geol.-min. sci. St. Petersburg: Publishing of the St. Petersburg State University, 23 p. (in Russian).
- Tarakanov R. Z., 2006. Velocity models and P-wave travel time curves for the Far East region. *Vestnik DVO RAN* (1), 81—95 (in Russian).
- Khain V. E., 1979. Regional geotectonics. Non-Alpine Asia and Australia. Moscow: Nedra, 357 p. (in Russian).
- Achauer U., Masson F., 2002. Seismic tomography of continental rifts revisited: from relative to absolute heterogeneities. *Tectonophysics* 358(1-4), 17—37. doi: 10.1016/S0040-1951(02)00415-8.

- Ashwal L., Burke K., 1989. African lithospheric structure, volcanism and topography. *Earth Planet Sci. Lett.* 96, 8—14.
- Feng M., Lee S., Assumpcao M., 2007. Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental mode group velocities of Rayleigh waves. *J. Geophys. Res.* 112. B04312. doi: 10.1029/2006JB004449.
- Glahn A., Granet M. and the Rhine Graben Teleseismic Group, 1993. Southern Rhine Graben: small-wavelength tomographic study and implications for the dynamic evolution of the graben. *Geophys. J. Int.* 113, 399—418.
- Gordienko V., 2016a. Deep-seated processes in the tectonosphere of continental rifts. *NCGT Journal* (3), 361—388.
- Gordienko V., 2016b. Deep-seated processes in the tectonosphere of oceans. *NCGT Journal* (4), 553—581.
- Gordienko L., Gordienko V., 2016. P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal* (3), 389—405.
- Kaesler B., Kalt A., Pettke T., 2006. Evolution of the lithospheric mantle beneath the Marsabit volcanic field (Northern Kenya): Constraints for textural, PT and geochemical studies on xenoliths. *J. Petrol.* 47(11), 2149—2184. doi:10.1093/ptrology/egl040.
- Koulakov I., Kaban K., Tesauro M., Cloetingh S., 2009. P- and S-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophys. J. Int.* 179, 345—366. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04279.x.
- Koulakov I., Bushenkova N., Burov E., Cloetingh S., El Khrepy S., Al-Arifi N., 2016. Evidence for anomalous mantle upwelling beneath the Arabian Platform from travel time tomography inversion. *Tectonophysics* 667, 176—188. doi: 10.1016/j.tecto.2015.11.022.
- Mooney W., Prodehl C., Pavlenkova N., 2002. Seismic velocity structure of the continental lithosphere from controlled source data. *International handbook of earthquake and engineering seismology*. V. 81a. P. 887—910.
- Nixon P. (ed.), 1983. *Mantle Xenoliths*. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd., 820 p.
- Olsen K. (ed.), 1995. *Continental Rifts: Evolution, Structure and Tectonics*. Amsterdam, Elsevier, 492 p.
- Ritter J., 2011. A mantle plume below the Eifel volcanic fields, Germany. *Earth Planet. Sci. Lett.* 186(1), 7—14. doi:10.1016/S0012821X(01)00226-6.
- Sobolev S., Zeyen H., Stoll G., Werling F., Altherr R., Fuchs K., 1996. Upper mantle temperatures from teleseismic tomography of the French Massif Central. *Earth Planet. Sci. Lett.* 139, 147—163. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00238-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00238-8).
- Walck M., 1985. The upper mantle beneath the north-east Pacific rim: a comparison with Gulf of California. *Geoph. J. Roy. Astron. Soc.* 81, 243—276.
- Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada Y., Gao S., 2006. Deep structure and origin of the Baikal rift zone. *Earth Planet. Sci. Lett.* 243, 681—691. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.033.

## Периодизация и характерные особенности глубинных процессов в докембрии на примере Украинского щита

© О. В. Усенко, 2017

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина  
Поступила 25 сентября 2017 г.

Детальна інформація про геологічну будову Українського щита (УЩ) дає змогу перевірити сучасне уявлення про те, що плюмова і плитова тектонічна активність можлива тільки після остаточного формування сублітосферної мантії 2,8—2,55 млрд років тому, а плюмові епізоди докембрію відбувалися 2,75—2,7; 2,45—2,4; 1,9; 1,8—1,75; 1,65 млрд років тому. На сьогодні можна вважати доведеним, що формування кори відбувалося до 4,0 млрд років тому, а плюмові події протерозою приводять до перетворення не тільки поверхні і кори, а й мантії. На УЩ можна виділити плюмові епізоди та визначити геологічні процеси, тому що ізотопний вік встановлено не за детритовими цирконами, а за тими, що входять до складу порід. Окремі епізоди об'єднуються в тривалі плюмові події (активізації) до 3,2; 3,2—2,8; 2,7—2,3; 2,3—1,65 млрд років тому. Особливості будови граніт-зеленокам'яної області Середньопридніпровського мегаблока УЩ дають змогу дійти до висновку, що до 2,7 млрд років тому потужної субконтинентальної літосфери, складеної тугоплавким перидотитами, не існувало. Шар, що кристалізувався з поверхні, був складений легкоплавкими мінералами і збагачений базальтоїдною компонентою. Потужність кристалічного шару скорочувалася до 100 і 50 км при винесенні розігрітої глибинної речовини і збільшувалася при кристалізації до 150—200 км. Астеносфера обов'язково містила розплав, розбавлений силікатно-водно-карбонатним флюїдом. Після 2,7 млрд років тому утворилися два великі блоки. На рубежі архею і протерозою (2,5 млрд років тому) територія УЩ була розділена на блоки і території, що просторово тяжіють до шовних зон. За складом товщ можна припускати, що на рубежі архею і протерозою утворилися тектонічні одиниці, що різняться перебігом глибинних процесів. Наступна плюмова подія (2,3—1,65 млрд років тому) проявлена як етап перетворення мантії і кори на всіх кратонах. У будові УЩ установлено беззаперечні ознаки плитовотектонічних процесів. Максимальні за амплітудою рухи відбувалися 2,0—1,65 млрд років тому. В процесі цієї плюмової події змінився склад флюїдів і розплавів, що виносилися з мантії. Гранітизація проходить за участі водних хлоридно-калієвих флюїдів. Після гранітизації активні сухі лужні карбонатно-фторидно-натрієві флюїди. Винесення розплавів, флюїдів відбувалося невеликими порціями, а режим пульсуючого плюму багато в чому визначав склад магматичних порід і гідротермальних розчинів.

**Ключові слова:** плюмова подія, межа літосфера—астеносфера, еволюція кори і мантії, континентальна літосферна мантія, смугаста залізна формація, тоналіт-трондєміт-гранодіоритова формація, коматіт, анортозити, лужні магматичні породи.

**Введение.** Интерес к ранней истории Земли вызван развитием аналитических методов, накоплением большого объема изотопно-геохимических данных. Это позволило выдвигать более обоснованные гипотезы о геодинамических процессах докембрия. При установлении времени фор-

мирования коры и мантии, этапов их дальнейшего развития используется возраст детритовых цирконов, монацитов и сульфидов с помощью различных изотопных систем [Carlson et al., 2005; Condie, 2011; Griffin et al., 2014 и др.]. Наиболее распространенные датировки интерпретируются

как этапы образования или наращивания коры. Также привлекаются петрохимические характеристики. В последнем случае речь идет об общих особенностях состава типов пород (коматиитов, базальтов и т. д.), которые присущи определенному этапу развития Земли. По этой информации устанавливаются особенности теплового режима и состава оболочек Земли на разных этапах ее развития, а также другие общепланетарные особенности, имеющие четкую временную привязку [Herzberg, Rudnick, 2012; Campbell, Griffiths, 2014 и др.]. Обработываются огромные массивы данных, что позволяет говорить о периодизации глобальных событий.

Существует ряд особенностей развития Земли в докембрии, которые в настоящее время не имеют однозначного объяснения. Коматииты и тоналит-трондjemит-гранодиоритовая (ТТГ) формация, представленные во всех гранит-зеленокаменных областях архея, никогда не встречаются впоследствии. Полосчатая железорудная формация (ПЖФ или Banded Iron Formation, сокращенно BIF) образуется главным образом в докембрии. Но и докембрийские железистые формации очень различны. Общепринятым является деление на тип Алгома, представленный в зеленокаменных структурах (ЗКС), и Сьюпериор — в палеопротерозойских шовных зонах. В работе [Bekker et al., 2010] предложено выделение двух железистых формаций по текстурно-структурным признакам: полосчатой (BIF) и зернистой (Ganular Iron Formation — GIF). Полосчатая формация более характерна для архейских и палеопротерозойских железистых пород, тогда как зернистая только для палеопротерозойских. В работе [Железисто-кремнистые..., 1991] выделены три железистые формации, различающиеся строением и составом. Архейская железисто-кремнисто-вулканогенная (ЖКВ) соответствует типу Алгома и встречается только в ЗКС, тогда как железисто-кремнисто-сланцевая (ЖКС) и железисто-кремнисто-карбонатная (ЖКК) приурочены к палеопротерозойским шовным зонам,

но образуются в разное время.

Не менее актуальна для докембрия проблема известняков и доломитов. Только после 2,7 млрд лет появляются, а после 2,1 млрд лет приобретают широкое развитие кальцифиры и графитовые сланцы, что связано с вынесением углерода вследствие активности плюмов. Резкое увеличение содержания  $^{13}\text{C}$  в морских карбонатах наблюдается около 2,2 млрд лет назад и продолжается еще 150 млн лет. Количество захороненного углерода превышает современный уровень в 12—22 раза. Максимальное накопление черных сланцев на всех континентах происходит 2,1—2,0 и 1,7—1,9 млрд лет назад. Отрицательное отклонение  $\delta^{13}\text{C}$  в углях и черных сланцах ( $-24$ ) свидетельствует о мантийном источнике метана [Holland, 2002]. Вынесение повышенных количеств  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в морскую воду приводит к резкому увеличению количества морских строматолитов.

Планомерное изучение Украинского щита (УЩ), проводившееся до 90-х годов прошлого века производственными и научными организациями [Геология..., 1967; Железисто-кремнистые..., 1978; 1991; Стратиграфические..., 1985 и др.], позволяет значительно дополнить перечень особенностей каждого периода развития Земли. Подобная возможность появилась в последние десятилетия, так как для многих магматических и метаморфических комплексов был установлен изотопный возраст магматизма, метаморфизма и других процессов, сопровождающихся образованием цирконов [Геохронология..., 2005, 2008; Лобач-Жученко и др., 2011, 2013; Lobach-Zhuchenko et al., 2014].

Превалирующий объем геологической информации представлен описаниями разрезов и магматических комплексов, которые сопровождаются петрохимическими и геохимическими аналитическими данными. Возможно, сегодня можно скептически относиться к их точности. Однако эта информация очень важна, так как она характеризует последовательность событий на всех мегаблоках УЩ от 3,65 до 1,65 млрд лет назад. Обобщения и анализ полученных

данных проведены в работах [Ультрабазитовые ..., 1979; Бордунов, 1983; Щербаков, 2005; Геолого-геофизическая..., 2008 и др.].

Исследователи УЩ настаивали на необходимости учета всех проявлений глубинных процессов. Магматизм, гидротермальная деятельность, метаморфические преобразования вулканогенно-осадочных комплексов, тектонические нагрузки являются формами растраты внутренней энергии Земли в виде тепловой энергии, механической работы, перераспределения вещества [Семененко, 1990]. Необходим четкий учет времени и последовательности проявления этих процессов, так как они могут быть многократно повторены на одном геологическом объекте. Однако каждое событие имеет присущие только ему вещественные и структурно-текстурные особенности [Венидиктов, 1986]. Современные исследования, проводимые с использованием новейших технологий, полностью подтверждают эти представления [Lobach-Zhuchenko et al., 2014].

Целью работы является разделение истории развития УЩ на периоды (плюмовые события или активизации) и установление специфики состава и строения магматических и метаморфических комплексов, проявления тектонических процессов, присущих каждому из них. Могут лишь оговариваться условия, необходимые для появления расплава или флюида подобного состава, сопоставляться породы, образованные из расплавов, дифференцированных в сходных *PT*-условиях. Построение геодинамической модели не входит в поставленные задачи. Проводится лишь общее сравнение развития УЩ с мнениями, представленными в литературных источниках.

**Современные представления о периодизации событий докембрия.** Современная модель тектоники плит включает в себя подъем мантийных плюмов — вертикальное перемещение вещества глубинных геосфер к поверхности или в верхние оболочки Земли [Лобковский и др., 2004; Богатиков и др., 2010; Гинтов, 2014; Ernst et al., 2016 и др.]. Причиной подъема счи-

тается механическая нестабильность глубинных перегретых масс, вызывающая всплывание плюма в окружении более холодного (более плотного) вещества [Рябчиков, Когарко, 2016]. Вследствие адиабатической декомпрессии происходит повышение степени плавления вещества плюма. Другая точка зрения главной причиной магнообразования в плюмовой обстановке предполагает вертикальную миграцию летучих компонентов (потoki восстановленных флюидов), снижающих температуры плавления силикатного материала [Wyllie, Ryabchikov, 2000; Green et al., 2001]. По мнению автора, это взаимодополняющие причины. В любом случае, плюмовый процесс предполагает наличие субконтинентальной литосферной мантии, в которой и происходит подъем плюма, отличающегося реологическими свойствами. В плит-тектонических моделях считается, что литосфера представляет собой жесткую и относительно холодную внешнюю оболочку, изолированную от конвектирующей астеносферы и характеризующуюся кондуктивным тепловым режимом. Литосфера включает кору и литосферную мантию, которая обеднена базальтоидной компонентой и отделена от обогащенной астеносферы границей раздела [O'Reilly, Griffin, 2010].

Согласно работе [Griffin et al., 2014], режим, существовавший до 3,5—3,2 млрд лет, нельзя назвать плюмовым, так как литосферная мантия начинает формироваться 3,5 млрд лет назад, а пик ее образования приходится на 3,0—2,8 млрд лет назад. Химический состав и даже реология кристаллического слоя в архее отличаются от состава и реологии субконтинентальной литосферной мантии. Только после ее окончательного формирования 2,8—2,55 млрд лет назад проявляется новый тектонический стиль с частыми активностями плюма, начало какой-либо формы тектоники плит и сохранение больших объемов континентальной коры [Griffin et al., 2014 и др.].

В статьях [Isley, Abbott, 2002; Ernst, Buchan, 2003] время появления магматичес-

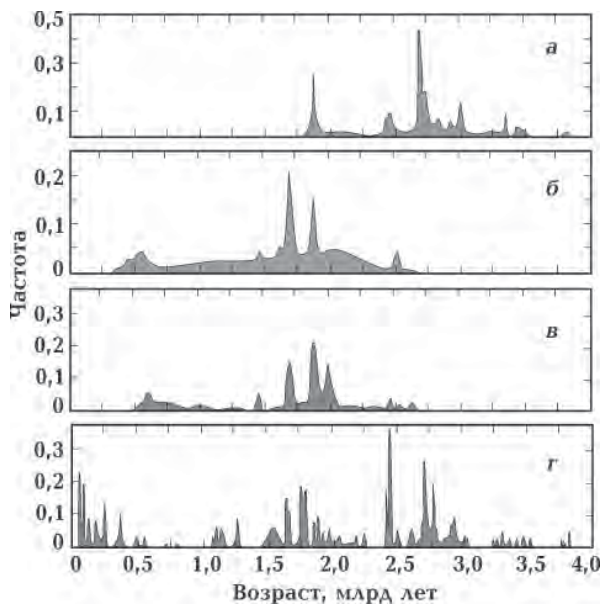


Рис. 1. Сопоставление периодичности возникновения железистых формаций (а), площади осадочных отложений (б), черных сланцев (графитоносных формаций) (в) с проявлениями плюмовых эпизодов по работе [Isley, Abbott, 2002] (г). Приведено по [Condie, 2011].

ких пород, имеющих мантийный источник (коматиитов, трапловых базальтов, мафических даек и расслоенных интрузий), применено для выявления единичных плюмовых эпизодов (mantle-plume event) в истории Земли. Ультрабазиты и базиты образовывались и в архее, но к собственно

плюмовым отнесены эпизоды докембрия, которые происходили 2,75—2,7, 2,45—2,4, 1,8—1,75, 1,65 млрд лет назад [Isley, Abbott, 2002]. К. Конди также выделяет эпизод 1,9 млрд лет назад (рис. 1). Многие авторы соотносят плюмовые эпизоды с распадом и объединением суперконтинентов [Condie, 2011; Griffin et al., 2014]. К этим пикам привязываются другие характеристики: изменение соотношений изотопов кислорода, углерода, серы, рельефа морского дна, проявлений гидротермальной деятельности, сопровождающейся хемогенным отложением осадков, изменения окислительно-восстановительного потенциала и рН морской воды, смена биоценозов и др. [Condie, 2011]. Плюмовые эпизоды сопровождаются образованием железистых формаций, накоплением осадочных толщ, в составе которых присутствуют и углеродсодержащие пласты (рис. 1), т. е. накопление осадков, в том числе железистых и графитоносных пород, связано с активностью плюма. Пики встречаемости детритовых цирконов (рис. 2) также находятся «внутри» плюмовых событий.

В работе [Condie, 2011] термин «плюмовый эпизод» четко не определен, но очевидно имеет более широкое значение, так как отражает не просто факт вынесения вещества из мантии, а соответствует процессу, характеризующемуся рядом осо-

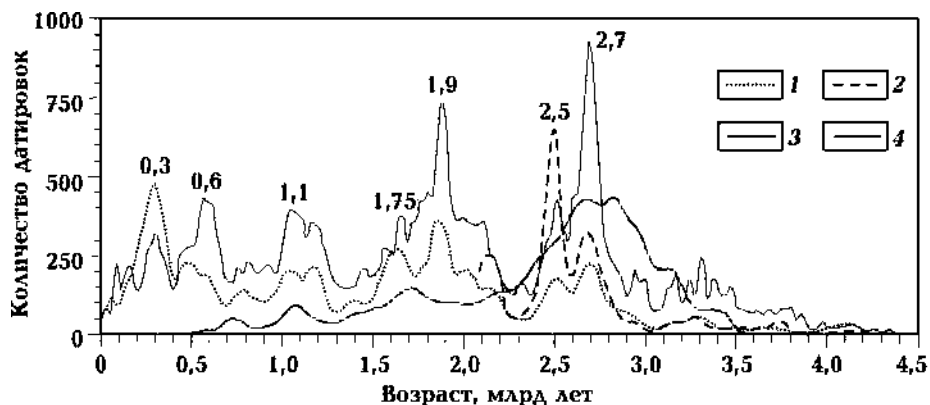


Рис. 2. Периодизация этапов образования коры и мантии [Литасов, Шацкий, 2016]. Цифры — время магматической активности и формирования континентальной коры. Данные  $^{207}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  изотопного возраста: 1 — [Belousova et al., 2010]; 2 — [Griffin et al., 2014] (период исследования ограничен 2,0 млрд лет); 3 — [Condie et al., 2015]; 4 — распределение возрастов литосферных алмазов (Re-Os метод) по работе [Griffin et al., 2014].

бенностей проявления. Для обозначения однократного подъема частично расплавленного вещества под жесткую литосферу используют термины апвеллинг и андерплейтинг (или подслаивание), которые также широко употребимы, но не очень четко очерчены. Единичные плюмовые эпизоды объединяются в длительный процесс, характеризующийся большим или меньшим количеством появлений мантийных расплавов (рис. 1, г). Тогда следует говорить о плюмовом событии, которое начинается с достижения плюмом границы 250 км, на которой образуются (дифференцированы) самые глубокие расплавы, достигающие поверхности.

Плюмовые эпизоды выделяются по факту появления магматических пород, т. е. исследуется частный случай, когда астеносфера является слоем частичного плавления, а литосфера представляет собой кристаллический слой, размещенный над астеносферой. Согласно исследованиям состава и условий образования мантийных перидотитов, распределение температур в мантии изменяется во времени, а граница астеносфера—литосфера (ЛАГ) подвижна. Она может опускаться вследствие гравитационного расслоения (эклогитизации) либо подниматься вследствие апвеллинга горячего вещества (подъема плюма) [O'Reilly, Griffin, 2010]. Проявление плюмовых эпизодов имеет пространственную привязку, т. е. речь идет о размещении слоя плавления под территорией, характеризующейся магматизмом сходного состава. Состав расплавов определяется глубиной размещения ЛАГ [Presnal et al., 2002 и др.]. Зная состав и возраст магматических пород, можно восстановить время подъема и опускания ЛАГ [Усенко, 2014]. И тогда ЛАГ соответствует размещению верхней кромки плюма под данной территорией на момент образования породы, т. е. имеет пространственно-временные координаты.

**Происхождение и состав первичной коры.** При изучении детритовых цирконов обнажения Джек Хиллс (Западная Австралия) было установлено, что протокора существовала уже 4,4—4,0 млрд лет назад, а

ее преобразование проходило в несколько этапов [Nebel et al., 2014]. Пик ее формирования приходится на 4,25 млрд лет назад [Holden et al., 2009] или 4,1—4,2 [Griffin et al., 2014].

Состав первичной коры установить затруднительно, так как она не сохранилась. Сегодня существуют разные мнения. Некоторые авторы считают, что первичная кора была базальтовой [Condie, 2011; Griffin et al., 2014 и др.]. Другие придерживаются мнения, что состав коры соответствовал тоналиту [Nutman et al., 2001; Щербаков, 2005 и др.]. В цирконах, образованных 4,4—4,1 млрд лет (изотопная система  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ), обнаружены включения калиевого полевого шпата, кварца, плагиоклаза, монацита и апатита, что предполагает гранитный источник самих цирконов [Maas et al., 1992]. Это подтверждается и низкой температурой их кристаллизации 700°C [Harrison et al., 2008]. Включения и кварца, и циркона образованы при кристаллизации из магматических расплавов [Griffin et al., 2014]. В связи с этим наиболее вероятным представляется, что первичная кора начала кристаллизоваться при падении температуры «магматического океана» и соответствовала составу базальта. Однако на поверхности оставались «озера» гранитной магмы, которые кристаллизовались при дальнейшем остывании. Остаточные кислые расплавы содержали водные флюиды, которые могли отделяться с поверхности в виде пара по мере кристаллизации гранитов. Это объясняет более высокие содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в гадейских цирконах (~7,5) по сравнению с изотопным составом пород мантии (~5,3) [Valley et al., 2002; Nebel et al., 2014]. По мнению автора, это более логичное объяснение, чем плавление водосодержащих пород типа глинистых сланцев, предложенное в работе [Valley et al., 2002]. Другими словами, первичная кора, по всей видимости, была гетерогенной, но базальты преобладали. Это подтверждается распределением РЗЭ в цирконах (40 зерен) обнажения Джек Хиллс, 10 % которых поступили из кислых пород, тогда как 75 % из пород с содержа-

нием  $\text{SiO}_2$  65 % [Cavosie et al., 2007]. Большое значение имели обмены с магматическим резервуаром, размещавшимся под тонким слоем кристаллического вещества.

Древнейшие породы обнаружены на Канадском щите [O'Neil et al., 2012]. Многопородный разновозрастный комплекс представлен гнейсами Акаста. Изотопный ( $^{207}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ ) возраст 4,28—3,96 млрд лет установлен в интенсивно деформированных амфиболитах и тоналитах. По всей видимости, они образованы уже после кристаллизации первичной коры, так как сложены перемежающимися гранодиоритами, тоналитами и трондjemитами, а также базальтами и ультрабазитами, метаморфизованными в амфиболитовой фации. Разрез, сложенный первично-вулканогенными породами (коматиитами, базальтами и тоналитами), типичен для архейских ЗКС. Они представлены на всех кратонах. Тоналиты Западной Гренландии образованы 3,87—3,66 млрд лет назад [Hiess et al., 2009], гнейсы Северо-Китайского щита — 3,8 млрд лет [Liu et al., 1992; Song et al., 1996], Восточно-Антарктического щита — 3,98 млрд лет [Беяцкий и др., 2011]. На УЩ самыми древними породами являются эндербиты Бугского мегаблока (БМБ) (3,75 млрд лет) и тоналиты новопавловского комплекса (3,67 млрд лет) [Геохронология..., 2005; Лобач-Жученко и др., 2011, 2013]. Статистическая обработка данных показывает, что в истории Земли были периоды, когда количество новообразованных цирконов резко возрастало (см. рис. 2), т. е. четко проявлена периодичность. Величина пиков у разных авторов разная, так как зависит от выборки и места опробования, однако сами пики выделяются во всех случаях. Обычно пики интерпретируются как этапы увеличения объема, наращивания коры [Condie, 2011]. Детритовые (обломочные) цирконы появляются при дезинтеграции магматических и метаморфических пород. Образование цирконов или наращивание молодых кайм на более древних ядрах возможно в присутствии гранитного расплава [Каулина, 2010]. Главный источник цирконов — граниты. Именно при их дезинте-

грации образуется основная масса детритовых цирконов. В меньших количествах цирконы кристаллизуются при образовании основных пород и метаморфизме (с привнесением расплавов-флюидов). Гранитные расплавы образуются при давлении не более 1,2—1,5 ГПа [Walter, 2005 и др.]. На докембрийских щитах неперемещенные (палингенные) граниты собственно слоя плавления выходят на поверхность на обширных территориях. Таким образом, возраст большей части детритовых цирконов отражает время кристаллизации магматических гранитов и слоя частичного плавления в коре.

**Этапы преобразования коры по результатам исследования ксенолитов.** Определение изотопного возраста нижнекоровых ксенолитов (в большинстве случаев вынесенных кимберлитовыми расплавами в девоне) свидетельствуют о многостадийной магматической и метаморфической эволюции. В северо-восточной части Сибирской платформы  $^{207}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  конкордантный возраст индивидуальных зерен цирконов из ксенолитов плагиогнейсов и кристаллосланцев составляет 2,9, 2,7 и 2,4 млрд лет. В то же время  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  модельный возраст свидетельствуют о том, что «протоко́ра» Сибирского кратона уже существовала 3,8—3,5 млрд лет назад. Основные этапы формирования архейской коры центральной части Якутской алмазоносной провинции — 3,8—3,5, 3,35—3,18, 2,95—2,38 млрд лет, а возрастной этап 2,0—1,78 млрд лет соответствует метаморфизму, который в ряде случаев сопровождался плавлением. По мнению авторов работы [Шацкий и др., 2005], это свидетельствует о многостадийном подслаивании коры более поздними ультрабазитовыми расплавами

Гранатовые гранулиты нижней коры, представленные в ксенолитах кимберлитовых трубок «Удачная» и «Комсомольская» на Сибирской платформе, были сформированы около 3,0 млрд лет назад и метаморфизованы 1,9—1,8 млрд лет назад [Koreshkova et al., 2009]. Возраст цирконов нижней коры на юге Сибирского кратона изменяется от архейского (3,4 и 2,6 млрд



лет) до палеопротерозойского (2,0, 1,88—1,85 млрд лет) [Poller et al., 2005].

**Время образования и преобразования литосферной мантии.** В работе [Carlson et al., 2005] собраны данные по всем кратонам мира. Самые древние мантийные ксенолиты обнаружены в Южной Африке (более 4,0 млрд лет), но пик определенных возраста приходится на период 3,0—2,8 млрд лет назад (см. рис. 2). Мантийные перидотиты этого возраста преобладают на всех кратонах. В трубке «Кимберли» в основании коры залегают ксенолиты, в которых ядра цирконов имеют возраст 3,2 млрд лет, а каймы образованы 2,9 млрд лет назад. Время формирования большей части перидотитов мантии в этой работе оценено в 2,89 млрд лет.

В работах [Carlson et al., 2005; Griffin et al., 2014] обобщены данные, согласно которым образование литосферной мантии представляет собой длительный процесс (см. рис. 2), а самые молодые алмазы (0,5 млрд лет) образованы накануне кимберлитообразования. При исследованиях ксенолитов, образованных в диапазоне *PT*-условий от 2,5 до 6,6 ГПа и от 720 до 1320 °С (трубки «Удачная» и «Обнаженная»), были обнаружены и палеопротерозойские перидотиты, Re-Os возраст которых близок к 2,0 млрд лет [Ionov et al., 2015]. Авторы считают, что мантия Сибирского кратона образована по меньшей мере в два этапа — 2,9—2,6 и ~2,0 млрд лет назад.

Ксенолиты мантийных перидотитов из двух кимберлитовых трубок северо-западной части Канадского щита характеризуются возрастом 3,0—2,6 млрд лет (в одной трубке диапазон составляет 2,8—2,6 млрд лет, а во второй 3,0—2,7 млрд лет). Палеопротерозойская группа соответствует периоду 2,1—1,7 млрд лет, а возраст около 546 млн лет — времени кимберлитообразования [Liu et al., 2016]. При этом наблюдается соответствие между возрастом пород на поверхности и временем образования ксенолитов. В геологическом строении района участвуют преимущественно архейские породы (2,9—2,7 млрд лет), но присутствуют и палеопротерозойские

(2,1—1,8 млрд лет), а также дайки диабазов (2,2—2,0 млрд лет).

С помощью Sm-Nd метода оценено время отделения от мантийного резервуара расплавов, образующих интрузивные породы (провинция Черчилль, Канада): 3,3 млрд лет, 2,9—3,1 млрд лет, 2,7—2,8 млрд лет назад [Peterson et al., 2010]. Наблюдается временная зависимость между проявлением на поверхности событий, инициированных в мантии, и отделением расплавов.

Изучение состава и *PT*-условий образования перидотитов ксенолитов также свидетельствует о более поздних преобразованиях сублитосферной мантии. Распределение температур, установленное по минералам перидотитов, показывает, что континентальная геотерма многих кратонов испытывает «излом». Происходит изменение градиента на глубинах 170—220 км (Лесото). На глубине 220 км превышение температуры достигает 300 °С. Изменения состава образцов, демонстрирующих повышенные температуры, однозначно свидетельствует о метасоматической переработке мантии под воздействием глубинного вещества. Это может объясняться только влиянием плюма, так как температура источника метасоматизирующего флюида должна быть намного выше околосолидусных температур [Boyd et al., 2004; O'Reilly, Griffin, 2010].

Состав и возраст ксенолитов, выносимых из мантии кимберлитами, подтверждает, что на кратонах плавление и частичное замещение мантии и нижней коры происходило неоднократно. Можно сделать вывод, что образование коры и мантии, а также преобразование их в палеопротерозое — общепланетарные процессы.

**Украинский щит.** Единой общепризнанной схемы корреляции стратиграфических разрезов УЩ в настоящее время не существует. Предложенная схема (табл. 1) основана на общих вещественных признаках и является гипотетической. Она не противоречит имеющимся определениям изотопного возраста, а ее обоснование приведено в работах [Усенко 2016а, б, 2017]. В данной работе она несколько изменена.

Таблица 1. Схема корреляции стратиграфических разрезов Украинского щита

млрд лет	ВМБ, ПАМБ	РТМБ	БМБ, ГШЗ	ИМБ	ККЗ	СПМБ	ОПШЗ, ПМ
Плюмовое событие (2,3—1,75 млрд лет назад). Третья активизация. Второй ТМЦ							
1,75 2,0					Глееватская свита		Садовая свита
Гранитизация. Первый ТМЦ							
2,0	Тетеревская серия Кочеровская свита	Белоцерковская толща Володарская толща	Бугская серия Хашчевато-завальевская Копаро-александровская свиты	?	Криворожская серия Гданцевская свита		Сачкинская (Дибровская) свита
					Темрюкская свита		
2,3	Городская свита						
Плюмовое событие (2,7—2,3 млрд лет назад). Вторая активизация. Второй ТМЦ							
2,3	Васильевская свита	Росинско-тикичская серия	Днестрово-бугская серия Павловская толща	Ингуло-ингулецкая серия		Саксаганская Склеватская Новокриворожская свиты	Белозерская серия Гуляйпольская свита
				Рощаховская свита	Чечелевская свита		
2,5			Гранитизация. Первый ТМЦ				
2,7			Тыровская толща (накопление)	Каменно-костоватская свита	Спасовская свита		
Дополновые события. Первая активизация							
2,8	Эндербит ?	?	Гранитизация	?	Конкская серия Гранитизация	Гранитизация	
3,0					Верхняя коматиитовая формация Андезито-базальтовая формация Гранитизация	Новогоровская, косицевская толща	
3,3					Коматиитовая формация Толейтовая формация Гранитизация		
Нулевая активизация							
3,65 3,8	?	?	Эндербиты	?	Аульская серия		Новопавловская толща

Автором используются термины, распространенные в отечественной литературе. Они приводятся наряду с более современными и шире употребляемыми. Активизация соответствует плюмовому событию для палеопротерозоя, тектономагматический цикл — процессу подъема или опускания ЛАГ. Между ними происходит гранитизация — формируется очаг плавления в коре, куда выносятся базальтовая составляющая, разбавленная флюидом.

Доплюмовые и плюмовые события (активизации) на УЩ неравномерно охарактеризованы в определениях изотопного возраста. Множественными датировками проявлены архейские события. Наиболее часты даты 3,65, 3,3, 3,1—2,95, 2,8 млрд лет. Еще более распространены цирконы, образованные 2,05—1,95 млрд лет назад. Многочисленными датировками магматических событий и гидротермальной активности обозначен интервал 1,8—1,65 млрд лет [Геохронология..., 2005, 2008; Лобач-Жученко и др., 2011, 2013; Lobach-Zhuchenko et al., 2014]. Значительно реже в этих работах встречаются определения возраста, относящиеся к плюмовому событию 2,7—2,3 млрд лет назад, а также к первой половине следующего плюмового события. Во многих случаях они «затерты» последствиями глобальной гранитизации ~2,0 млрд лет.

Все доплюмовые и плюмовые события проявлены в Хашчевато-Завальевской структуре Среднего Побужья. Они зафиксированы благодаря особенностям геологического строения и большому количеству определений. В работах [Геохронология..., 2005, 2008] приведены датировки: 3,65, 3,38, 3,1, 2,9—2,8, 2,72, 2,57, 2,36, 2,16, 2,09—1,93 млрд лет, в статьях [Лобач-Жученко и др., 2011, 2013] — датировки 3,62—3,51, 3,34, 3,28, 2,87, 2,67—2,66, 2,45, 2,14, 2,08, 1,98 млрд лет. На поверхность выведены породы, метаморфизованные в гранулитовой фации, что говорит о больших глубинах их первичного залегания. При подслаивании коры значительные объемы расплава, обогащенного флюидом, проникают в кору. Происходит ее частич-

ное плавление — гранитизация. В течение нескольких плюмовых событий, породы, в настоящее время выведенные на поверхность, могли размещаться на глубине 20 км и более. В них сохранились цирконы, образованные или доразращенные на каждом этапе частичного плавления и замещения коры.

Выделяются те же периоды, что и в работе [Isley, Abbott, 2002] (см. рис 1). Однако для УЩ эти рубежи во многих случаях имеют привязку к геологическим событиям и процессам, так как датированы не детритовые цирконы, а входящие в состав пород.

**Архей. Нулевая активизация.** Первичная кора УЩ могла быть сформирована около 3,8 млрд лет назад. В работах [Лобач-Жученко и др., 2011, 2013] формирование протолита оценивается временем 3,65—3,5 млрд лет назад. Проявления глубинных процессов в архее можно разделить на два «доплюмовых» события или две активизации. Продукты нулевой активизации, протекавшей на УЩ до 3,3—3,2 млрд лет назад, сохранились в виде реликтов пород, погруженных в гранитную матрицу только в Орехово-Павлоградской шовной зоне (ОПШЗ). В процессе первой активизации образована гранит-зеленокаменная область Среднеприднепровского мегаблока (СПМБ). Окончание «доплюмовых» или «доплитовотектонических» событий на УЩ (~2,7 млрд лет назад) установлено по времени появления посттектонических интрузивных гранитов на СПМБ.

На Новопавловском участке ОПШЗ породы залегают в виде крутопадающих слоев, сложенных пироксенитами (возраст 3,365 млрд лет), перидотитами и тоналит-трондьемитами (возраст 3,36 млрд лет) [Геохронология..., 2005]. Гранат-биотитовые гнейсы Васильковского участка в северной части ОПШЗ содержат цирконы, образованные 3,64, 3,5 и 2,86 млрд лет назад. Формирование ультрамафитов (из глубинных расплавов) датировано 3,65 и 3,5 млрд лет назад, тоналитов и лейкосомы гранитов — 3,4—3,3 млрд лет назад. В это время существовал слой плавления в коре. В тоналитах присутствуют цирконы, образован-

ные 3,4, 3,25, 2,85, 2,65, 2,1 млрд лет назад, в гранитах — 3,4, 3,3, 2,0 млрд лет [Lobach-Zhuchenko et al., 2014]. Возможно, гранитизация и метаморфизм происходят и 3,5—3,4 (?), и 3,3 млрд лет назад. Таким образом, период 3,65—3,5 млрд лет назад проявлен в магматизме, источники вещества которого размещались на разных уровнях. Высокомагнезиальные мантийные расплавы образуются уже 3,65 млрд лет назад, что означает существование кристаллической оболочки (первичной коры) до глубины 40—50 км. По мнению И. Б. Щербакова, до образования пород новопавловского комплекса уже существовала кора, способная обеспечить гранулитовый метаморфизм [Щербаков, 2005].

Многочисленны определения ~3,3 млрд лет в редуцированных ЗКС Западного Приазовья. Близкий возраст у гранодиоритов и тоналитов добропольского комплекса, ассоциирующих с Косивцевской и Сорокинской структурами (3,32—3,39 млрд лет [Геохронология..., 2005]). В статье [Lobach-Zhuchenko et al., 2014] в Сорокинской структуре обозначены и детритовые цирконы, возраст которых 3,7 млрд лет.

События этого времени зафиксированы и на Побужье [Лобач-Жученко и др., 2011, 2013]. В лейкосоме образца гнейсо-эндербитов гранулитового комплекса (Одесский карьер) обнаружены цирконы разного возраста (3,58, 3,15, 3,1, 2,75, 2,5 и 2,0 млрд лет). В другом образце возраст изученных цирконов составляет 3,5, 3,3, 3,0, 2,7, 2,2 млрд лет. Большая часть цирконов имеет магматическую природу, но присутствуют и метаморфические. В этом же карьере представлены метаортопироксениты, в которых присутствуют цирконы, образованные 3,67, 3,48, 3,3 и 2,86 млрд лет назад. Очевидно совпадение с датами, установленными в ОПШЗ.

**Первая активизация 3,2—2,8 млрд лет. Особенности проявления.** ЗКС мира сформированы от 4,0 до 2,8 млрд лет назад. Время формирования ЗКС СПМБ 3,17—2,8 млрд лет назад [Геохронология..., 2005]. В период 3,0—2,95 млрд лет образована большая часть гранитов днепровского

петровского комплекса ТТГ формации, слагающих гранитогнейсовые купола. В ОПШЗ формирование тоналитов продолжается до 2,8 млрд лет. Здесь и в Западном Приазовье также отчетливо фиксируется зеленокаменный этап. Вследствие более высокого уровня эрозионного среза, чем в СПМБ, тектонический рисунок гранит-зеленокаменной области (ГЗО) сохранился, но значительно более редуцирован. На него наложена разломно-блоковая тектоника, характерная для палеопротерозоя. Остатки ЗКС представлены Новогоровской и Чистопольской в ОПШЗ, Косивцевской в северном Гайчурском и Сорокинской в южном Салтычанском блоках Западного Приазовья. Сорокинский пояс — сложная структура. Породы, типичные для ЗКС, находятся в ее северной части. В работе [Lobach-Zhuchenko et al., 2014] указано, что в Сорокинской структуре есть и цирконы, возраст которых 3,7 млрд лет, а согласно работе [Геохронология..., 2005] время образования ее фундамента 3,35 млрд лет. Породы зеленокаменного этапа развития относятся ко времени 3,16—2,86 млрд лет назад, а состав садовой свиты в южной части подтверждает ее образование после 2,0 млрд лет.

В центральной и западной частях УЩ архейские датировки известны на границе Росинско-Тикичского (РТМБ) и Подольского (ПДМБ) мегаблоков. В РТМБ архейские цирконы (2,9 млрд лет) установлены в плагиогранитах фундамента. В Литинской структуре ПДМБ обнаружены эндербиты, возраст которых 2,8 млрд лет [Геохронология..., 2005, 2008]. Можно предположить, что и здесь протекал зеленокаменный этап развития, была образована ГЗО, переработанная в более поздних процессах. Есть и другие мнения [Гинтов, 2014; Lobach-Zhuchenko et al., 2014]. Однако существование архейского фундамента под большей частью территории УЩ (за исключением Вольнского мегаблока (ВМБ)) признается всеми. Модель развития, предложенная в работе [Griffin et al., 2014], предполагает одинаковое развитие и близкое строение под всем щитом.

Многие проявления глубинных процессов одинаковы в гранит-зеленокаменных областях всех кратонов, но никогда не встречаются в протерозое и фанерозое. Одним из наиболее часто упоминаемых является эффект коматиитов. Он заключается в образовании вулканогенных пород, практически полностью сложенных серпентинизированным высокомагнезильным оливином. Это отражается в их химическом составе. Серпентиниты (коматииты) Сурской ЗКС содержат до 40 % MgO и близкое количество SiO<sub>2</sub>. Часто сопровождаются хромитовым оруденением [Ультрабазитовые..., 1979]. Среди причин появления коматиитов называются более высокие температуры в мантии архея [Condie, 2011], так как температура кристаллизации архейских коматиитов 1560—1600 °C [Arndt, Leshner, 2004; Herzberg et al., 2007]. Преобладание оливина в композиции солидуса (увеличение доли MgO в расплаве) требует давлений, существенно превышающих 7 ГПа. Соответственно, источники магм располагаются глубже 250 км [Arndt, Leshner, 2004] или даже 300—450 км [Condie, 2011].

Породы ТТГ формации архея образуют гранитогнейсовые купола. По мере приближения к ЗКС увеличивается количество реликтовых амфиболитов. В составе пород преобладают плагиоклаз (андезин) и кварц, но содержание темноцветных (преимущественно амфибола и биотита) может достигать 40 % (в гранодиоритах). Отличаются очень низким содержанием калия, который концентрируется в биотитах, и полным отсутствием микроклина. Сходные составы можно получить при частичном плавлении основных пород в широком диапазоне *PT*-условий ( $T=700—1100$  °C,  $P=0,3÷3,5$  ГПа) [Лобач-Жученко, 2014]. Кристаллизация плагиоклаза, т. е. образование в расплаве структуры, соответствующей плагиоклазу, возможно при давлении 1,2 ГПа [Presnal et al., 2002; Walter, 2005], что ограничивает глубину дифференциации расплава корой. Трудно объяснить и высокие температуры архейских тоналитов. Температура ликвидуса состав-

ляет 1200 °C и немного снижается (1100 °C) в присутствии большого (11 мас. %) содержания H<sub>2</sub>O [Wyllie, 1977]. Подобный прогрев недостижим только вследствие более высокого геотермического градиента архея, так как при такой температуре кристаллическая кора не может существовать вплоть до поверхности.

При изучении гранитоидов днепропетровского комплекса СПМБ УЩ установлен еще ряд особенностей. По структурно-текстурным особенностям толщи В. И. Орса выделил четыре фазы гранитообразования и складчатости [Орса, 1988]. Возраст 15—20 % цирконов составляет 3,3—3,18 млрд лет. Эти цирконы могут представлять собой как реликты замещаемых толщ, так и гранитоиды, образующиеся до начала формирования ЗКС. Подобный возраст установлен для гранодиоритов добропольского комплекса ПМБ. Магматогенные цирконы образованы 3,03—2,97 млрд лет назад (большая часть 3,01 млрд лет [Бобров та ін., 2008]). Граниты сурского комплекса образованы в процессе четырех фаз кислого вулканизма: 3,17—3,13, 3,1—3,08, 3,07—3,04, 3,0—2,95 млрд лет [Артеменко, 1998]. Другими словами, гранитизация проявлена не только непременными (палингенными) гранитами ТТГ формации, но и их магматическими аналогами. Для появления гранитных расплавов необходимо наличие слоя плавления в коре. Даты гранитообразования СПМБ и структурно-текстурные особенности указывают на длительное существование и как минимум четырехкратное пополнение очага плавления глубинными расплавами.

На УЩ можно выделить еще несколько характерных черт, присущих архею.

Амфиболиты (измененные базальты) встречаются во всех ЗКС мира и значительно шире распространены, чем коматииты. В СПМБ амфиболиты, апоспидиты, зеленые сланцы с редкими прослоями железисто-кремнистых роговиков наряду с кварц-магнетит-хлоритовыми сланцами с альбитом и биотитом слагают основную часть конкской серии. Расплавы базальтов образуются на всех этапах развития Зем-

ли, в том числе в настоящее время. Они не столь экзотичны как коматииты или карбонатиты, однако с ними в архее выносятся основная часть базальтоидной компоненты и становится возможна кристаллизация мантии.

На УЩ установлены интрузивные аналоги коматиитов и амфиболитов в Авдотьевском, Александровском и Софиевском интрузивных массивах. В состав массивов входят гранодиориты и диориты. Их возраст 3,095—3,06 млрд лет [Геохронология..., 2005].

Наблюдается корреляция минерального и химического состава вулканогенных и сланцевых пластов, залегающих в непосредственной близости. С амфиболитами ассоциируют роговообманковые и альбит-эпидот-хлорит-актинолитовые сланцы с кварцем и биотитом, а с коматиитами (серпентинитами) карбонатно-тальковые, актинолит-хлоритовые, хлоритовые и карбонатно-хлоритовые сланцы. В сланцевых пластах существенна доля вулканогенного материала [Геология..., 1967].

Состав вулканогенных и сланцевых пластов ЗКС закономерно изменяется во времени [Бордунов, 1983]. Постепенно возрастает доля андезитов и снижается коматиитов при близком количестве базальтов. В толеитовой и коматиитовой толщах, образованных до 3,0 млрд лет, преобладают хлорит-актинолитовые сланцевые пласты, в которых относительно невысоко содержание  $Al_2O_3$  (4—9 %) и  $SiO_2$  (40—50 %), тогда как среднее содержание  $MgO$  20—25 %, при 10—12 %  $FeO$ . Кварц-альбит-серицитовые сланцы, в которых хлорит и карбонат могут присутствовать в незначительных количествах, появляются 3,0—2,8 млрд лет назад в андезит-базальтовой туфолавовой формации. Резко сокращается количество  $MgO$  (не более 5 %) и возрастает глинозема (до 19 мас. %) [Геология..., 1967].

Метаморфические изменения толеитовых базальтов и сопутствующих сланцевых пластов обусловлены присутствием воды (водных растворов, содержащих хлорид-ионы и кремнезем). В изменении

коматиитов участвуют и водные, и карбонатные флюиды, а в непосредственной близости залегают брейнериты (карбонаты магния) [Ультрабазитовые..., 1979]. Многие факторы указывают на активность хлора и подвижность кремнезема в составе водных флюидов, поступающих из мантии вместе с расплавом [Усенко, 2016а].

Обязательной составляющей ЗКС являются железистые пласты. Они относятся к типу Алгома или ЖКВ формации [Железисто-кремнистые..., 1991]. Генетическая связь с вулканогенными пластами проявлена в обязательном присутствии силикатных минералов (роговой обманки, куммингтонита, хлорита), а также карбонатов (магнезита и сидерита) в кварц-магнетитовых слоях. Вулканогенные и сланцевые пропластки также входят в состав железистых пластов. Например, на Восточно-Грановском участке Верховцевской структуры железистые пачки содержат вулканогенные спилиты, амфиболиты, которые переслаиваются с куммингтонит-магнетит-кварцевыми и хлорит-актинолит-магнетит-кварцевыми джесперами, а разделяющие пачки сложены хлорит-тальковыми сланцами и карбонат-тальк-хлорит-актинолитовыми сланцами, амфиболитами [Железисто-кремнистые..., 1978]. Хлорит, актинолит, куммингтонит наряду с кварцем, магнетитом и сидеритом являются обязательными составляющими железистых пластов.

Минеральный состав вулканогенных, сланцевых и железистых пластов специфичен. Они сложены преимущественно серпентином, тальком, хлоритом. Из карбонатов распространены брейнерит, сидероплезит, реже доломит. Это магнезиальные минералы, которые образуются при высоком окислительном потенциале. Широко развит магнетит. Распространены амфиболы, в том числе железистые, тогда как пироксены практически отсутствуют, что свидетельствует об избытке кремнезема и воды при кристаллизации расплава. Кварцевые прослои, альбититы и олигоклазиты можно рассматривать как продукт флюидной фазы, в которой рас-

творены кремнезем, глинозем и натрий в количествах, соответствующих гранитному расплаву. Большая часть хлоридно-водного флюида, обогащенного кремнеземом и глиноземом, выносится из мантии в кору и способствует ее плавлению, а не возникает за счет плавления пород коры, как в фанерозе.

Перечисленные особенности минерального состава всех пластов ЗКС и ТТГ формации отражены в их химическом составе. Все породы обогащены магнием, хромом и железом, мало калия, нет титана. Натрий входит в состав альбита и олигоклаза, кальций — в состав амфиболов, тогда как карбонаты магниезиальные и железистые. Наблюдается корреляция поведения железа и магния и обратная к ним — кальция. Железо и магний активны в недифференцированной силикатной и карбонатной фазах. Из первой кристаллизуются коматииты (серпентиниты) из второй — брейнериты. Представляется важным распределение катионов между вулканогенными и хемогенно-осадочными пластами, особенно карбонатными. Магнезиальные коматииты ассоциируют с магниезиальными карбонатами (брейнеритом). Причем магний и железо распределяются между ними равномерно. Кальций активен почти исключительно в силикатном расплаве, дифференцированном на глубине 50—100 км в присутствии воды. Входит в состав амфибола или плагиоклаза и не входит в состав карбонатов. Кальцита нет, а доломит мало распространен.

Все вышеперечисленные признаки характерны только для архея и проявлены на всех архейских кратонах.

Строение ГЗО обусловлено пластичным состоянием толщи до 2,8 млрд лет [Орса, 1988] и отсутствием разломной тектоники в том виде, в котором она проявляется от палеопротерозоя до современности [Гинтов, 2014]. Слой плавления в коре, из которого в избытке выносятся расплавы, флюиды, растворы, пропитывающие всю толщу, существует на протяжении 200 млн лет. Общий тектонический рисунок ГЗО возникает вследствие диапиризма гранит-

ных масс [Glikson, 1993], т. е. в пластичной толще (речь идет об уровне, выходящем на поверхность в настоящее время, в архее он находился на глубине не менее 10 км).

Другими словами, на УЩ подтверждается мнение, высказанное в работе [Griffin et al., 2014], что архейские события нельзя назвать плюмовыми или плейт-тектоническими, так как до кратонизации СПМБ 2,8—2,6 млрд лет назад кора и мантия отличались от протерозойских и фонерозойских как химическим и минеральным составом, так и реологическими свойствами. Буквальный перевод термина, приведенного в статье [Griffin et al., 2014], означает «режим застойной покрывки». Приведенное выше описание позволяет говорить также о режиме «пластичной покрывки» или «покрывки, пропитанной расплавами и флюидами». Мощной субконтинентальной мантии, сложенной тугоплавким перидотитом, в архее не существует. Пик ее формирования приходится на 3,0 и продолжается до 2,7 млрд лет (см. рис. 1). Состав вулканогенных пород позволяет предположить, что мощность кристаллического слоя сокращается до 100 и 50 км при привнесении разогретого глубинного вещества и увеличивается при кристаллизации до 150—200 км. Кристаллизующийся слой сложен относительно легкоплавкими минералами и обогащен базальтоидной компонентой. Астеносфера обязательно содержит расплав, разбавленный силикатно-водно-карбонатным флюидом.

В работе [Семенов, 1990] период 3,6—2,7 млрд лет отнесен к докембрию I. По мнению Р. И. Кутаса, в это время осуществлялась крупномасштабная конвекция под относительно тонким кристаллическим слоем, мощность которого могла изменяться от 150—190 до 60—80 км, уменьшаясь при вынесении глубинного вещества [Кутас, 2008]. Близкие значения мощности кристаллического слоя получены по составу магматических пород [Усенко, 2016а].

**Плюмовое событие 2,7—2,3 млрд лет (вторая активизация УЩ).** В работе [Isley, Abbott, 2002] к этому времени отне-

сены два плюмовых события (2,7—2,6 и 2,45 млрд лет назад), которым соответствует пик образования детритовых цирконов 2,5 млрд лет. По мнению К.Конди, имело место одно плюмовое событие 2,7 млрд лет назад, отраженное в появлении коматитов [Condie, 2011]. Проявляется также в обилии полосчатых железистых пород Сьюприор типа (BIF формации). Кремни, отлагающиеся из гидротерм 2,7 млрд лет назад, имеют положительные аномалии Eu. Наблюдается пик образования золоторудных месторождений. Появляются скопления графита. При этом фиксируется отрицательное отклонение  $\delta^{13}\text{C}$ , что может отражать либо увеличение активности эндогенных углеводородов, либо обширную дестабилизацию гидрата метана. И то, и другое может быть следствием мантийного плюма [Hinrichs, 2002]. Резко увеличивается количество морских строматолитов [Hofmann et al., 1999], что отражает повышенный вклад  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в морскую воду.

**Время проявления и тектоническое районирование.** На УЩ затруднительно установить время начала и окончания плюмового события (второй активизации), а также многие параметры процесса из-за отсутствия однозначных датировок. Период 2,7—2,3 млрд лет назад обозначен по косвенным признакам. Однако сам факт протекания события и его проявления устанавливаются определенно.

В работе [Усенко, 2016б] верхняя граница отнесена к 2,2 млрд лет, однако на многих блоках время ~2,3 млрд лет упоминается как ранний рубеж формирования метаморфической толщи и ультрабазитового магматизма следующего плюмового события. Например, в ОПШЗ [Lobach-Zhuchenko et al., 2014] Зеленовадовская толща Голованевской шовной зоны (ГШЗ) образуется 2,26 млрд лет назад, а ультрамафиты днестровско-бугской серии ГШЗ — 2,31 млрд лет назад. Метаморфические породы ПДМБ и БМБ, монациты в гранитоидах бердичевского комплекса датированы 2,23—2,26 млрд лет в [Геохронология..., 2008]. Рои даек диабазов и долеритов на СПМБ появляются 2,27 млрд лет назад

[Геохронология..., 2008]. По всей видимости, эти события маркируют начало следующего плюмового события.

Переход от событий архея к плюмовым событиям неоархея—палеопротерозоя проявлен в определениях изотопного возраста цирконов Хащевато-Завальевской структуры Среднего Побужья, примыкающей к ГШЗ. К рассматриваемому событию относятся датировки: 2,72, 2,57, 2,36 млрд лет [Геохронология..., 2005, 2008] и 2,67—2,66, 2,45 млрд лет [Лобач-Жученко и др., 2011]. Период 2,6—2,67 млрд лет назад охарактеризован как время проявления структурно-метаморфических преобразований [Лобач-Жученко и др., 2011].

Начало плюмового события знаменуется изменением тектонического режима — *делением территории УЩ на два крупных блока*. Образуются разломные зоны [Гинтов, 2014]. После 2,8—2,7 млрд лет назад развитие УЩ на запад и восток от Ингулецко-Криворожской шовной зоны (ИКШЗ) разное (рис. 3). На СПМБ и в ОПШЗ 2,8—2,6 млрд лет назад образуются интрузивные массивы гранитов, в составе которых постепенно увеличивается доля микроклина. В метаморфических породах и тоналитах Васильевского участка ОПШЗ только в одном образце обнаружено ядро циркона, образованное 2,65 млрд лет назад [Lobach-Zhuchenko et al., 2014]. В случае проявления метаморфизма, сопровождающегося перераспределением не только тепла, но и вещества, количество подобных цирконов было бы больше.

В Ингульском мегаблоке (ИМБ) (вероятно в РТМБ, возможно в ПДМБ и ВМБ), происходит накопление вулканогенно-осадочной толщи, позднее метаморфизованной. Метаморфические породы спасовской и каменно-костоватской свит ингуло-ингулецкой серии (см. табл. 1) совершенно отличны от пород ЗКС. Резко сокращается количество вулканогенных пластов относительно сланцевых, но в нижней толще все еще широко представлены ультрабазиты и амфиболиты. Метаморфические породы спасовской и каменно-костоватской свит ингуло-ингулецкой



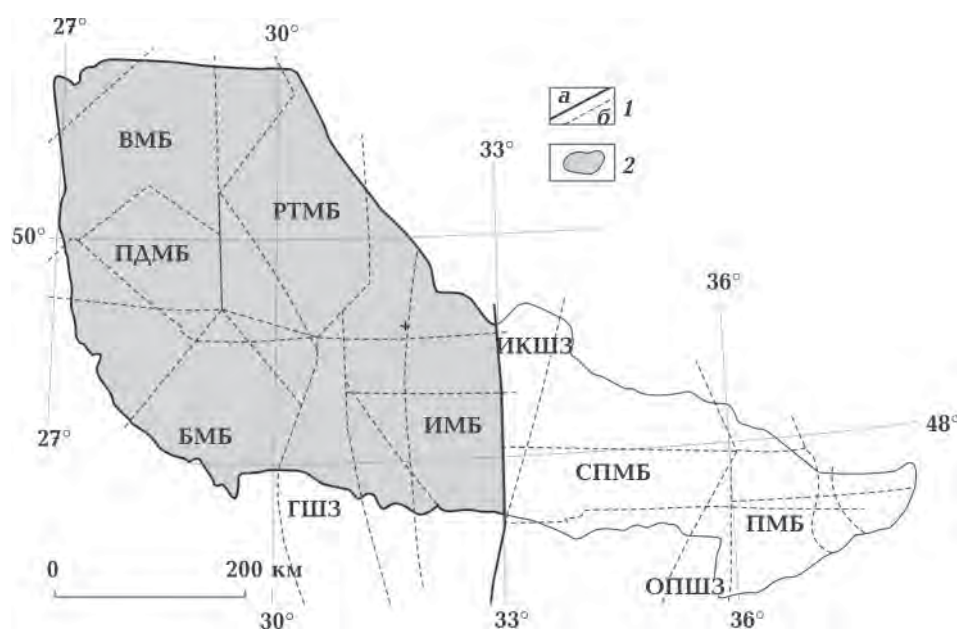


Рис. 3. Схема районирования мегаблоков ~2,7—2,5 млрд лет назад: 1 — разломы (а — ограничивающие территорию активизации, б — современные); 2 — территория, на которой представлены породы, образованные 2,7—2,5 лет назад. Сокращения: ВМБ — Волынский мегаблок, ПДМБ — Подольский мегаблок, РТМБ — Росинско-Тикичский мегаблок, БМБ — Бугский мегаблок, ИМБ — Ингульский мегаблок, СПМБ — Среднеприднепровский мегаблок, ПМБ — Приазовский мегаблок, ГШЗ — Голованевская шовная зона, ИКШЗ — Ингулецко-Криворожская шовная зона, ОПШЗ — Орехово-Павлоградская шовная зона.

Вынесено на схему современного разломно-блокового строения УЩ по работе [Гинтов, 2014]. В неоархее—палеопртерозое блоки и территории, пространственно тяготеющие к шовным зонам, имели другие очертания.

серии (см. табл. 1) совершенно отличны от пород ЗКС. Характерными чертами обеих свит является переслаивание пачек магнетит-биотит-гиперстеновых гнейсов с амфибол-гиперстен-биотитовыми, гранат-биотитовыми, магнетит-гранат-кордиерит-биотитовыми [Стратиграфические..., 1985]. Гранат и кордиерит не встречаются в породах ЗКС СПМБ.

В РТМБ на границе с ПДМБ датированы породы юрьевского и тетиевского комплексов (2,8, 2,73, 2,6, 2,49 млрд лет), а также мигматизированные амфибол-биотитовые гнейсы и амфиболиты (с. Попельня). Их возраст 2,63—2,77 млрд лет, т. е. они могут быть образованы в начале плюмового события. Граниты тетиевского комплекса РТМБ содержат цирконы, возраст которых 2,7, 2,59 и 2,49 млрд лет. Это плагиограниты, во многих случаях калишпатизированные в процессе глобальной гранитизации 2,0 млрд лет назад.

Кроме того, И. Б. Щербаков указывает, что тетиевские граниты содержат ксенолиты пород белоцерковско-володарской толщи, образованной после 2,3 млрд лет [Щербаков, 2005]. Здесь, как и в ГШЗ, наблюдается совместное залегание разновозрастных пород, на которые наложены гранитизация и метаморфизм 2,5 и 2,0 млрд лет назад, что делает практически невозможным установление первичного залегания. Датировки 2,4—2,5 млрд лет как время гранитизации возникают для побужского комплекса наряду с более древними (2,8 млрд лет) и более молодыми (2,03 млрд лет) [Геохронология..., 2008].

Породы ТТГ формации сменяются плагиогранитами. В процессе гранитизации образуются неперемещенные шереметьевские плагиограниты ВМБ с переходами в биотитовые, амфибол-биотитовые гранодиориты. Эндербиты и плагиочарнокиты ташлыкского комплекса (2,56 млрд

лет) развиваются по гнейсам нижних свит ингуло-ингулецкой серии в ИМБ. Граниты являются преимущественно плагиоклазовыми. Количество наложенного позднее (~2,0 млрд лет назад) микроклина сильно варьирует. Гранитизация и метаморфизм проявлены один раз — на пике плюмового события 2,5—2,45 млрд лет назад.

**Деление на блоки и территории, пространственно тяготеющие к шовным зонам.** Не ранее 2,6 и не позднее 2,45 млрд лет назад происходит следующее крупномасштабное изменение тектонического режима (рис. 4). Два крупных блока делятся на более мелкие тектонические единицы — блоки и шовные зоны<sup>1</sup>. Ограничивающие их разломы образованы 2,45 млрд лет назад [Гинтов, 2014]. Значения 2,5—2,6 млрд лет соответствуют времени гранитообразования в ГШЗ, метаморфизма в РТМБ. В чечелеевской свите ингуло-ингулецкой

серии ИМБ обнаружены детритовые цирконы, возраст которых 2,67, 2,5, 2,45 млрд лет. Вероятно, это время образования нижней спасовской свиты. Возможно, это плюмовое событие было проявлено в ВМБ и ПДМБ, однако утверждать нельзя из-за отсутствия датировок. На ВМБ установлен изотопный возраст шереметьевских гранитов — 2,43 млрд лет [Верхогляд, Скобелев, 1995]. Позднее эта дата не упоминается. Ранее автором было высказано предположение, что в этом плюмовом событии образованы васильевская и городская свиты тетеревской серии [Усенко, 2016б]. Более вероятно, что васильевская свита накапливается непосредственно после гранитизации 2,45—2,5 млрд лет назад, а городская и кочеровская свиты формируются в следующем плюмовом событии (см. табл. 1).

Главным признаком территорий, пространственно тяготеющих к шовным зонам, служит обязательное присутствие железистых пластов формации Сьюперior. В работе [Железисто-кремнистые..., 1991] эта формация разделена на две: ЖКС и

<sup>1</sup> Термин шовные зоны обозначает современные тектонические единицы УЦ [Гинтов, 2014]. Районирование раннего докембрия не совпадает с современным, поэтому правильнее говорить о территориях, пространственно тяготеющих к шовным зонам.

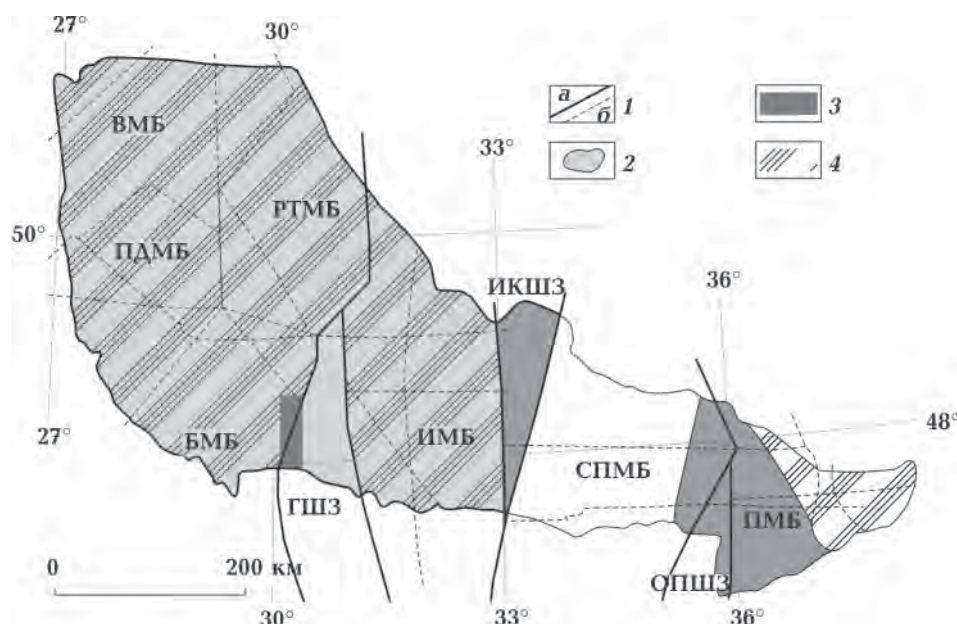


Рис. 4. Схема районирования мегаблоков 2,5—2,3 млрд лет назад (второго ТМЦ второй активизации): 1 — разломы (а — разделяющие блоки и шовные зоны, б — современные); 2 — территория, на которой представлены породы первого ТМЦ; 3 — территории, на которых сохранились породы железисто-кремнисто-сланцевой формации шовных зон; 4 — территории, представляющие блоки во втором ТМЦ второй активизации. Сокращения см. на рис. 3.

ЖКК. Они имеют различный состав и образованы в разное время. В рассматриваемое плюмовое событие образуется ЖКС формация, представленная в скелеватской и саксаганской свитах криворожской серии. Во всем мире пик ее образования датирован 2,5 млрд лет [Klein, 2005]. Следующий пик накопления железа (2,2—1,8 млрд лет назад) совпадает со временем образования ЖКК формации, развитой в гданцевской свите криворожской серии.

Нижняя часть криворожской серии не датирована. ИКШЗ и ОПШЗ в неoarхее и палеопротерозое являлись продолжением Курской магнитной аномалией (КМА). Датируется лебединской серии КМА образованы 2,59 млрд лет назад, остаповские калиевые граниты — 2,53 млрд лет назад [Глубинное..., 2010]. Эти даты считаются временем заложения будущих железорудных поясов, которые в пределах УЩ традиционно называются шовными зонами. Формирование оскольской свиты КМА, с которой уверенно сопоставляется гданцевская свита криворожской серии, происходит от 2,3 до 2,04 млрд лет назад. Тогда нижние свиты (саксаганская и скелеватская) предположительно образованы после 2,6 и до 2,3 млрд лет. Несколько особняком стоит новокриворожская свита, сложенная амфиболитами и пикритами. Возможно, она образована при делении УЩ на два крупных блока, а время ее образования (~2,7 млрд лет?) оторвано от времени образования скелеватской свиты. Возраст кластогенных монацитов скелеватской свиты 2,84 млрд лет, однако это не означает, что нижняя новокриворожская серия образована в это время, так как Криворожско-Кременчугская зона разломов (ККЗ) окружена архейскими тектоническими блоками и с запада, и с востока.

На востоке СПМБ породы ЖКС формации присутствуют в Конкско-Белозерской структуре, в южной части ОПШЗ. ИКШЗ закладывается на архейском фундаменте, а белозерская серия надстраивает разрез конкской серии Конкско-Белозерской ЗКС. На ПМБ ими сложена Гуляйпольская структура, они представлены в Кор-

сакском блоке. Цирконы (2,65 млрд лет) обнаружены и в Сорокинской, и в Мангушской структурах [Lobach-Zhuchenko et al., 2014]. В центральной части Сорокинской структуры присутствуют породы, которые относятся к ЖКС формации, т. е. образованы в это время. Тогда, возможно, процесс распространялся на западную или юго-западную часть ПМБ. Садовая свита южной части Сорокинской структуры образована в следующем плюмовом событии, как и дибровская свита Мангушской структуры, разрез которой включает в себя железистые пласты ЖКК формации.

ГШЗ разделяет западную часть УЩ. К 2,5 млрд лет здесь, как и в ИМБ, накоплена нижняя (тывровская ?) толща. К ЖКС формации ГШЗ относятся железистые кварциты павловской толщи. ГШЗ закладывается на границе РТМБ, БМБ и ИМБ на неoarхейском вулканогенно-осадочном комплексе. Сложно установить, как протекал процесс, однако наличие пород ЖКС формации, ограничение разломами, возраст которых 2,45 млрд лет, допускает вычленение ГШЗ именно в это время.

**Особенности строения и вещественного состава пород блоков 2,5—2,3 млрд лет назад (центральная и западная части УЩ).** На блоках происходит накопление метаморфической толщи, в которой проявлена ритмичность строения. Верхние свиты ингуло-ингулецкой серии сложены гранат-биотитовыми и биотитовыми, кордиерит- и графит-биотитовыми, диопсидовыми гнейсами. В роцеховской свите преобладают гранат-биотитовые и гранат-кордиерит-биотитовые гнейсы.

В васильевской свите тетеревской серии переслаиваются биотитовые, гранат-биотитовые, гранат-кордиерит-биотитовые, гранат-силлиманит-биотитовые, графитовые и графит-биотитовые гнейсы. Встречаются биотитовые мигматиты и амфибол-биотитовые сланцы. Выше по разрезу графит-биотитовые сланцы распространены еще шире, также встречаются актинолит-тремолитовые, амфибол-диопсидовые с прослоями кальцифиров, а также кальцит-цоизит-амфиболитовые

прослой. Васильевскую свиту образуют шесть толщ с различным характером чередования [Стратиграфические..., 1985].

Присутствие магматических пород, расплавы которых вынесены из мантии, свидетельствует о плюмовом процессе. Возраст габбро-амфиболитов юрьевского комплекса РТМБ 2,58, 2,73 млрд лет [Геохронология..., 2008]. Нарцизовский комплекс является его аналогом [Щербаков, 2005]. Комплексы включают перидотиты и пироксениты, амфиболиты. В амфиболитах обнаружены реликты оливина и пироксена, что позволяет относить их к пикритобазальтам. Горнблендиты содержат до 80 % роговой обманки. Присутствуют и сильно измененные (до актинолититов и серпентинитов) перидотиты, в которых содержание MgO достигает 30 %. Породы базальт-андезитобазальтовой формации нарцизовского комплекса представлены амфиболитами, метапорфиритами и метагабброидами.

Измененные вулканогенные породы представлены амфиболитами и биотит-гиперстеновыми кристаллосланцами ингуло-ингулецкой серии, амфиболитами РТМБ.

В неоархее—палеопротерозое происходит сокращение общего объема и основности ультрабазитов. Коматиты сменяются пикритами. Происходит смена ТТГ формации плагиогранитами, возраст которых составляет 2,5 млрд лет. В центральной и западной частях УЩ полевые шпаты гранитов по-прежнему представлены плагиоклазом.

Минеральный состав метаморфических и магматических пород на блоках совершенно отличен от пород ЗКС. Даже в нижних толщах отсутствуют минералы, образующиеся при высоком окислительном потенциале. А присутствие кордиерита, силлиманита, графита свидетельствует о повышении щелочности и протекании окислительно-восстановительных реакций, в которых происходит восстановление углерода. Наличие ритмичности метаморфических толщ однозначно указывает на существование континентальной мантии, состав которой близок к составу лерцолита.

Регулярное поступление порций глубинного расплава к подошве литосферы не вызывает ее плавления, как в архее. Наличие кристаллического слоя на глубине 100 км обеспечивает длительное существование физико-химической системы, в которой происходит цепочка процессов. Следствием падения давления является разделение на несмешиваемые фазы (отделение небольших порций карбонатных флюидов). Остаточные расплавы, состав которых соответствует базальту, взаимодействуют с флюидом. Происходит обогащение флюидной фазы глиноземом и калием, а протекание химических реакций приводит к восстановлению углерода.

Состав пород ингуло-ингулецкой серии изменяется от метаандезита до метатолейта [Щербаков, 2005], т. е. снижается основность пород. Пикриты присутствуют, но их количество относительно невелико, т. е. не происходит вынесение значительных количеств глубинных недифференцированных расплавов на поверхность.

**Территории, пространственно тяготеющие к шовным зонам** приурочены к разломам, образованным 2,5—2,45 млрд лет назад, т. е. их образование начинается после накопления нижней метаморфической толщи в центральной и западной частях УЩ. Магматические породы представлены метаморфизованными пикритами и амфиболитами.

Обязательно присутствие пород ЖКС формации. Именно ЖКС формация является типичной полосчатой железисто-кремнистой ритмичной (ВIF) формацией. В ГШЗ и ОПШЗ присутствуют кусочки формации в разрезах со сложным тектоническим строением, тогда как в ККЗ четко устанавливается последовательность залегания пород и взаимоотношения между ЖКС и ЖКК формациями. Как и в ЗКС, состав магматических и железистых пластов связан между собой. Однако связь совершенно иного рода, чем в архее. Если в ЗКС СПМБ связь состава железистых и сланцевых пластов отражена в близком катионном составе, то в ККЗ фиксируется протекание окислительно-восстановитель-

ных реакций, разделение их продуктов на фазы и неравномерное распределение катионов между ними. В четвертом горизонте саксаганской свиты ККЗ последовательно залегают джеспилиты, вулканогенные спилиты и графитоносные сланцы. В отличие от архея железо концентрируется в водно-силикатной фазе в виде хлоридных комплексов. Она является более окисленной и более кислой, что и объясняет присутствие двухвалентного европия. Пласты, залегающие в непосредственной близости, представлены амфиболитами, образованными из нейтральных расплавов, и графитсодержащими сланцами. Образование графита (углеводородов) происходит вследствие восстановления углерода при участии щелочных флюидов. Железистые пласты содержат карбонатную фазу, тогда как в сланцевых появляется графит.

Для железистых пластов ЖКС формации характерны ритмично-слоистые структуры, которые отличны от ритмично-слоистых структур блоков. Их образование происходит на этапе подслаивания коры. Саксаганская свита Кривого Рога

состоит из семи пар чередующихся сланцевых и железистых пластов (горизонтов), внутри которых выделяются пачки (подгоризонты), внутри пачек — макрослои, внутри макрослоев — мезослои, внутри мезослоев — попарно чередующиеся более или менее богатые железом микрослои. Минеральный состав и химические характеристики слоев всех порядков приведены в работе [Железисто-кремнистые..., 1978]. Подобное строение считается продуктом сложных взаимодействий между мантийным веществом, поставляемым плюмами, тектоническими движениями поверхности, задающими уровень дна океана, химическими реакциями и воздействиями микроорганизмов [Bekker et al., 2010]. По мнению автора [Усенко, 2015], разделение на несмешиваемые фазы происходит вследствие окислительно-восстановительных реакций, протекающих непосредственно в плюме (образуются горизонты), в магматических очагах у поверхности (подгоризонты), а также разделения фаз разного состава по мере охлаждения гидротерм (последовательной кристаллизации) и по

**Т а б л и ц а 2. Предполагаемая корреляция стратиграфических единиц и гипотетическое протекание плюмовых процессов (изменение размещения ЛАГ) в событии 2,7—2,3 млрд лет назад**

Время, млрд лет назад	ЛАГ, км	Ингульский блок	ЛАГ, км	СПМБ	ЛАГ, км	ККЗ, Шовные зоны
2,3	150	—	—	—	150	—
—	100	Верхняя ритмичная толща более глиноземистая	—	—	100	Магнетит-куммингтонитовые слои
—	20 50 →	Гранитизация (плагииграниты) Пикриты	—	—	50	Хлорит-карбонат-магнетит, кварцевые сланцы
2,5			—	—	100	Кератоспилиты
					50	Хлорит-талковые сланцы. Джеспилиты
					100	Эпидиабазы
2,6	100	Ритмичная толща с прослоями амфиболитов	20	Граниты	150 200	Пикриты Перидотиты
—	150	Массивы ультрабазитов	20	Граниты	—	—
2,7	200		20	Граниты	—	—

плотности на дне морского бассейна с образованием макро- и микроритмичности.

Продуктивная толща сложена магнетит-карбонатными джесперами и магнетитовыми и гематит-магнетитовыми джеспилитами. Сидероплезит присутствует в верхней и нижней частях железистого пласта, а оксиды железа — в центральной. Хлорит замещает биотит в куммингтонит-хлоритовой массе силикатных слойков, что свидетельствует о привнесении окисленных глубинных флюидов. В отличие от блоков ритмичность проявлена в окисленной и кислой фазе, переносящей железо. Сначала отделяется карбонатный флюид, а оставшаяся флюидная фаза обогащается кислородом и кремнеземом, т. е. в шовных зонах происходит разгрузка окисленных и кислых флюидов. В процессе дифференциации образуются гематит и магнетит, увеличивается доля кислорода в железистых пластах.

Железистые пласты ЖКС формации отличаются от ЖКВ формации отсутствием примеси вулканогенного материала, меньшим распространением железистых силикатов (хлорита, куммингтонита) и большим количеством оксидов железа, концентрирующихся с кремнеземом в отдельную фазу. Изменяется минеральный состав и сланцевых пластов (табл. 3).

В шовных зонах сланцевые, магматические, железистые пласты образованы при участии глубинного (мантийного, плюмового) вещества. Анализ состава вулканогенных, сланцевых пластов и ЖКС формации четко фиксирует смену режима дифференциации после формирования ЗКС и кратонизации СПМБ. Как и на блоках, она проявлена в сокращении количества вулканогенных пластов, которые присутствуют в виде прослоев ультрабазитов (пикритов) и амфиболитов. И железистые, и сланцевые пласты содержат меньшее количество магния, отсутствуют хромиты, что указывает на снижение окислительного потенциала расплава и флюида на всех уровнях. В ККЗ появляется графит и щелочные силикаты.

Как и на блоках, общий состав выно-

симого из мантии вещества изменяется. Появление щелочных амфиболов и пироксенов, а также графитовых слоев свидетельствует о протекании окислительно-восстановительных реакций. С толщами, накапливающимися на блоках, сближает преобладание сланцевых пластов, наличие графита. Но метаморфические толщи блоков не содержат хлоритоиды, в них отсутствуют железистые пласты, в их валовом составе меньше кремнезема и железа, но больше глинозема и калия. Первично-осадочная толща большинства блоков содержит малое количество магнетита, практически во всех пластах присутствует биотит.

Флюиды, выносимые в шовных зонах, характеризуются более высоким окислительным потенциалом. Это может быть обусловлено большими глубинами источников вещества и отсутствием времени на дифференциацию. Возможно, в шовных зонах доля флюида в веществе плюма значительно выше, что и определяет его более быстрое продвижение к поверхности. Подъем плюма в шовных зонах протекает с большей скоростью, тогда как на блоках происходит длительная остановка на каждом уровне (медленный подъем).

В центральной и, возможно, западной частях УЩ можно выделить плюмовое событие, начинающиеся около 2,7 млрд лет назад. Около 2,5 млрд лет назад формируются гранитоиды, а вынесение расплавов и флюидов из мантии возобновляется после 2,5 млрд лет. Тогда как на СПМБ 2,8—2,6 млрд лет назад — время кратонизации. В ОПЩЗ и ПМБ плюмовое событие начинается 2,5 млрд лет назад. Состав толщ, накапливающихся на блоках и территориях, пространственно тяготеющих к шовным зонам, позволяет предполагать, что на рубеже архея и протерозоя происходит вычленение тектонических единиц, плюмовые процессы в которых протекают по-разному.

**Плюмовое событие 2,3—1,65 млрд лет назад (третья активизация).** Отличительными чертами этого плюмового события считаются большое количество черных сланцев, резкое потепление (1,9—1,7 млрд

лет назад) вследствие парникового эффекта (выброса  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ), пик накопления железистых пластов; обилие неглубоких морских залежей фосфатов; появление и разнообразие строматолитов. Образование железистых формаций и осаждение морских фосфатов 1,9 млрд лет назад, по мнению К. Конди, отражает увеличение поступления железа и фосфора вследствие гидротермальной активности. Повышенное содержание  $\text{CO}_2$  в океанах является следствием вулканической и гидротермальной деятельности, сопровождающей мантийный плюм. Первые массивные залежи сульфатов в геологической истории образуются 1,8—1,6 млрд лет, что также рассматривается как проявление мантийного плюма 1,9 млрд лет назад [Condie, 2011].

Наблюдается эволюция состава мафит-ультрамафитового магматизма. После 2,3—2,2 млрд лет высокомагнезиальные расплавы, широко распространенные в

архее и менее распространенные в раннем палеопротерозое, сменяются мантийными расплавами с высокими содержаниями железа, калия, титана, фосфора, щелочей и несовместимых элементов. Увеличение доли этих элементов достигает максимума 2,2—2,0 млрд лет назад, что обусловлено возрастанием роли пикритов и базальтов, обогащенных железом и титаном. Первые очевидные свидетельства тектоники плит относятся к рубежу 2,0 млрд лет [Богатиков и др., 2010].

На УЩ с этим событием связано множество проявлений, отражающих глобальное изменение тектонического режима и состава флюидов, поступающих из мантии. Современное строение УЩ главным образом сформировано 2,0—1,65 млрд лет назад как следствие проявления плейт-тектонических процессов и режима пульсирующего плюма [Гинтов, 2014]. На блоках образуются глубинные разломные

**Т а б л и ц а 3.** Сопоставление породных ассоциаций архейских ЗКС и ККЗ, образованных при одинаковом размещении ЛАГ

Породные ассоциации		ЛАГ, км
Верховцевская ЗКС	Криворожская и Анновская структуры	
Хлорит-актинолитовые и карбонат-серпентин-тремолитовые сланцы	Покровы тремолитизированных пикритов. Хлорит-биотитовые сланцы с гранатом, серицитом, куммингтонитом, графитом. Магнетит-куммингтонитовые джесперы с яшмовыми слоями	150
Амфиболиты, спилиты, кварц-хлоритовые туфосланцы	Эпидиабазы, альбит-эпидотовые амфиболиты, кварц-роговообманковые эпидозиты. Графитит-хлорит-серицитовые, биотит-кварц-куммингтонитовые сланцы	100
Кварц-альбит-хлорит-актинолит-эпидотовые сланцы. Тальк-карбонатные, тальк-серпентинитовые породы, хлорит-актинолитовые сланцы с сульфидами. Серпентиниты (коматииты)	Хлорит-тальковые сланцы с тремолитом и доломитом. Магнетит-силикатные джеспилиты, силикат-магнетит-гематитовые, гематит-магнетитовые джеспилиты продуктивной толщи	50
Актинолитовые апоспилиты и актинолитовые зеленокаменные роговики	Куммингтонитовые слои с магнетитом, альбитом, магнезиально-железистой слюдой. Эгирин-магнетитовые и гематит-магнетитовые джесперы	100
Серпентиниты (коматииты) и тальк-карбонатные породы с гнездами никелистого талька	Карбонатизация. Слой магнезиальных куммингтонит-магнетитовых и магнетитовых джесперов	50

зоны, накапливаются эксгальционно-осадочные толщи, образуются массивы монзонитов и калиевых гранитов, с которых начинается образование глобального слоя плавления в коре (2,08—2,04 млрд лет назад). С ними связаны месторождения золота. Формирование массивов анортозитов—гранитов рапакиви и месторождений титана, редкометалльных пегматитов, ураноносных альбититов происходит 1,8—1,74 млрд лет назад.

На территориях, пространственно тяготеющих к шовным зонам, образуются комплексы карбонатитов, ореолы фенитизации. С ними связана редкометалльная минерализация и включения углеводородов, фосфатные и марганцовистые породы. В шовных зонах происходит накопление мощных толщ кальцифиров (доломитовых и кальцитовых), образуются месторождения графита. Продолжается формирование железистых толщ, в составе которых

существенна роль карбонатов. Отличительной чертой этого плюмового события является и появление ультрабазитов, состав которых приближается к коматиитовому стандарту, с которыми связаны хромитовые рудопроявления.

**Блоки. Тектоническое районирование.**

Сохраняется деление на блоки и территории, пространственно тяготеющие к шовным зонам. Границы последних, возможно, расширяются. Блоки дробятся на еще меньшие тектонические единицы (рис. 5).

Деление блоков коры происходит накануне гранитизации. В центральных частях блоков перед гранитизацией образуются Грузско-Еланчикская разломная зона и тектонический шов Херсон-Смоленск. В Западной части УЩ в период 2,0—1,8 млрд лет назад формируются Звиздаль-Залесская, Брусиловская и Немировская разломные зоны [Гинтов, 2014]. Проекция на поверхности разломной зоны

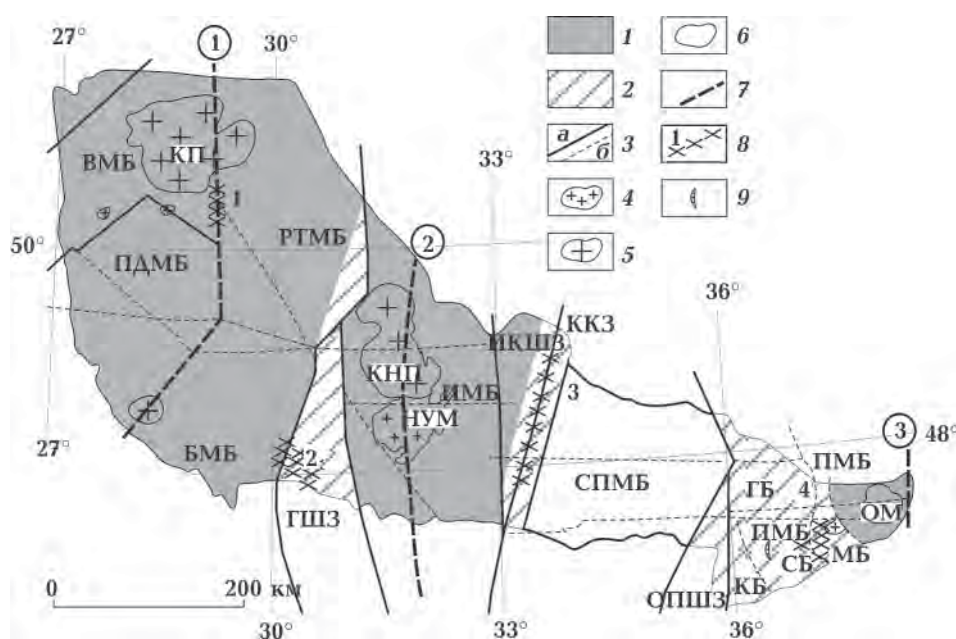


Рис. 5. Схема районирования мегаблоков в плюмовом событии 2,3—1,65 млрд лет назад: 1 — блоки, участвующие в активизации; 2 — территории, пространственно тяготеющие к шовным зонам; 3 — разломы; 4 — массивы монзонитов-калиевых гранитов; 5 — плутоны анортозитов-гранитов рапакиви; 6 — Октябрьский массив; 7 — разломные зоны, образованные в процессе плюмового события; 8 — распространение пород (1 — кочеровская свита; 2 — бугская серия; 3 — гданцевская свита; 4 — дибровская (сачкинская) свита); 9 — Черниговский комплекс карбонатитов. Сокращения: ККЗ — Криворожско-Кременчугская зона; КБ — Корсунский блок; ГБ — Гайчурчский блок; СБ — Салтычанский блок; МБ — Мангушский блок; КП — Коростенский плутон; КНЦ — Корсунь-Новомиргорский плутон; НУМ — Новоукраинский массив; ОМ — Октябрьский массив. Остальные сокращения см. на рис. 3.



Херсон—Смоленск представлена территорией, размещенной от Звенигородско-Братского до Кировоградского разломов, а проекция Грузско-Еланчикской зоны охватывает все Восточное Приазовье. Особенностью их существования является постоянная активность от момента образования (не позднее 2,05 млрд лет назад) до конца палеопротерозойского этапа (1,75—1,6 млрд лет назад). Все магматические массивы, связанные с этими зонами, характеризуются многофазным становлением, а урановые альбититы ИМБ образуются в процессе возобновляющейся гидротермальной активности 2,07, 1,8, 1,75, 1,67, 1,62, 1,58 млрд лет назад [Металлические..., 2005]. К зонам глубинных разломов территориально привязаны массивы монзонитов—микроклиновых гранитов (Букинский, Новоукраинский (НУМ), Хлебаровский), анортозитов—гранитов рапакиви (Коростенский плутон (КП), Дрокийский массив, Корсунь-Новомиргородский плутон (КНП)), Октябрьский массив (ОМ) щелочных пород, а также месторождения золота, поля редкометалльных пегматитов. Именно с этими разломными зонами связаны месторождения титана в ВМБ и урана в ИМБ. Они проявляются и в плюмовых событиях фанерозоя [Пашкевич, Бакаржиева, 2016]. Сегодня проявления мантийного плюма под трансрегиональным магматическим швом Херсон—Смоленск наблюдаются в виде расслоенной скоростной колонки как выхода мантийных флюидных потоков. Их производные в виде гидротермальных растворов выносятся на поверхность [Старостенко и др., 2014].

В это время происходит активизация Конкской, Девладовской, Субботско-Мошоринской и других субширотных разломных зон, так как массивы, пегматитовые поля, урановые метасоматиты в большинстве случаев находятся в узлах их пересечения с субмеридиональными.

**Метаморфическая толща.** Городская свита тетеревской серии характеризуется ритмичным чередованием графит-биотитовых, амфибол-биотитовых, мусковит-биотитовых силлиманитовых, графит-

товых гнейсов и сланцев, т. е. наследуются особенности дифференциации прошлой активизации. Увеличивается количество графита. В нижней части кочеровской свиты переслаиваются и ритмически чередуются гранат-биотитовые гнейсы и сланцы. Однако в центральной части появляются маломощные прослои кальцифиров и карбонатно-диопсидовых кристаллосланцев, хотя кальцифиры и мраморы редки. Затем состав метаморфической толщи резко изменяется. В верхней подсвите чередуются силикатные, силикатно-карбонатные и карбонатные породы, причем карбонатные породы слагают более половины объема. Породы тетеревской серии прорываются гранитами житомирского типа (2,05 млрд лет). Вынесение карбонатных флюидов предшествует образованию очага плавления в коре.

**Магматические породы.** Это плюмовое событие характеризуется уникальными магматическими комплексами. До гранитизации и в ее процессе (табл. 4) образуются массивы *габбро-монзонитов—трахитоидных гранитов*. В НУМ калием обогащены даже наиболее основные породы, дифференциация расплавов которых осуществляется в мантии. Характерно обогащение титаном и железом. Содержание калиевого полевого шпата в отдельных разновидностях достигает 60 %. Важным признаком, указывающим на флюидный режим дифференциации под корой, является устойчивость плагиоклаза, в котором концентрируется кальций, а также формирование железистых оливина и ортопироксена. Подобное распределение свидетельствует об активности водного флюида, хлорид-ионов, в присутствии которых подвижны не только железо, но и калий. Окислительно-восстановительный потенциал близок к буферу QFM [Петрология..., 2011]. Наблюдается пространственная и генетическая связь с золоторудными проявлениями.

**Гранитизация.** Около 2,05 млрд лет назад происходит подслаивание коры, а затем формируется очаг плавления в коре (см. табл. 4). Постепенные переходы от

магматических новоукраинских к неперемещенным кировоградским гранитам зафиксированы в ИМБ. Палингенные микроклиновые граниты и мигматиты в ВМБ, ПМБ, БМБ представлены житомирскими (возраст 2,09—2,04 млрд лет) и бердичевскими (возраст 2,04 млрд лет), в РТМБ — уманскими (возраст 2,05—1,99 млрд лет), в Восточном Приазовье — анадольскими (возраст 2,03—2,04 млрд лет) [Пономаренко и др., 2014]. Палингенные граниты отсутствуют (или не выведены на поверхность) только в центральной части СПМБ. В ККЗ скважиной СГ-8 помимо плагиогранитов, возраст которых составляет 2,81—3,07 млрд лет, в гданцевской и глееватской свитах вскрыты плагиоклаз-микроклиновые анатектические граниты, возраст которых 1,87—2,02 млрд лет [Криворожская..., 2011]. Воздействие флюида приводит к интенсивной микроклинизации днепропетровских гранитоидов, окружающих ККЗ — образуются ингулецкие и саксаганские.

Это значит, что под большей частью УЩ около 2,0 млрд лет в коре существовал очаг плавления. В Западном Приазовье он не выведен на поверхность. Продукты его деятельности залегают в виде не-

правильной формы тел среди архейских кристаллосланцев (возраст 2,74 млрд лет [Петрология..., 2011]) в Салтычанском блоке. В эндербитах Мангушского блока присутствуют цирконы двух генераций: 2,73 и 2,16 млрд лет. На поверхности находятся архейские толщи, испытавшие замещение вследствие проникновения, замещения расплавами (флюидами). Условия  $T=620\div 730\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P=0,43\div 0,6\text{ ГПа}$  [Петрология..., 2011]. Учитывая точность определения (а, возможно, и неравномерный прогрев), очевидно наложение комплекса преобразований. Архейская толща подвергается метаморфизму с привнесением вещества.

Этот процесс задокументирован на Васильковском участке ОПШЗ [Lobach-Zhuchenko et al., 2014]. Здесь не позднее 2,3 млрд лет назад начинается накопление осадков, которое длится до 2,1 млрд лет (самый древний циркон 2,08 млрд лет). Первое преобразование пород происходит 2,1 млрд лет назад при  $P>0,85\text{ ГПа}$  и  $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Проявлено в формировании высокоглиноземистых гнейсов с гранатом с высокомагнезиальным более древним ядром и высококальциевой более молодой каймой, которая обрастает кордиеритом (до 30 %), биотитом, плагиоклазом (анор-

**Т а б л и ц а 4. Глубина дифференциации расплавов при формировании Новоукраинского и Хлебодаровского массивов и палингенных гранитов [Петрология..., 2011] (цифры — изотопный возраст (млрд лет) по работе [Геохронология..., 2008])**

Ингульский мегаблок Новоукраинский массив	ЛАГ, км	Восточное Приазовье Хлебодаровский массив	ЛАГ, км
Основные породы габбро-монзонитовой формации 2,037	50	Габбро, габбро-сиениты	50
Кварцевые монзониты, сиениты, пироксеновые граниты 2,036—2,025	50	Гиперстеновые и двупироксеновые кварцевые сиениты	50
Граниты гранат-биотитовые известково- щелочные 2,04—2,02	20	Биотит-роговообманковые, пироксеносодержащие граниты 2,02	20
Гранитизация			
Граниты кировоградские 2,04—1,97	20	Граниты анадольские 2,08	20

тит 35 %), силлиманитом, кордиеритом, калиевым полевым шпатом и кварцем. К 2,0 млрд лет температура изменяется незначительно (до 650 °С), давление падает до 0,6 ГПа, а затем до 0,58 ГПа при 740 °С. На следующем этапе образуется ансамбль высокомагнезиального граната и биотита. Он является индикатором повышения температуры до 800 °С. Затем появляется ансамбль калиевого полевого шпата, плагиоклаза (анортит 35 %) и кварца, который характеризует понижение давления (парциального флюида или снятие горизонтальных напряжений) от 0,85 до 0,65 ГПа. А ансамбль кордиерита, биотита и граната образован при температуре 675—600 °С и давлении 0,33—0,4 ГПа. Связь с плюмовым процессом подтверждается синхронным появлением ультрабазитов, расплавы которых имеют мантийный источник. Фиксируется четкая связь между тектоническими нагрузками, прогревом и привнесением вещества, т. е. температура и давление являются независимыми переменными, не пропорциональными глубине [Семенов, 1990].

После гранитизации в ВМБ, БМБ, ИМБ образуются массивы анортозитов — *гранитов рапакиви*. Дифференциация рас-

плавов, из которых образуются породы КП и КНП в западной центральной частях УЩ, происходит по близким схемам (табл. 5).

В породах КП и КНП содержание железа очень высоко, оно находится в двухвалентной форме. Ультраосновные породы (гарцбургиты) КНП содержат близкие количества SiO<sub>2</sub> и FeO, а в троктолитах возрастает содержание глинозема и кальция за счет плагиоклаза, количество которого достигает 30 %. Титан образует магматические месторождения. Состав магматических комплексов свидетельствует об удержании воды и кальция в расплаве, дифференциация которого протекает под корой, что и приводит к образованию анортозитов. На это указывают и высокие концентрации двухвалентного железа, тогда как на присутствие фтора — обогащение расплавов глиноземом. Однако щелочность повышена несущественно, так как на ликвидусе расплавов, дифференцированных на границе кора—мантия, образуется плагиоклаз, в основных породах отсутствует отрицательная аномалия европия (он двухвалентен и может замещать кальций в плагиоклазе), что говорит о нейтральной среде и присутствии воды. Карбонатная (возможно, гидрокарбонат-

**Таблица 5.** Глубина дифференциации расплавов при формировании Корсунь-Новомиргородского плутона и Октябрьского массива (цифры изотопный возраст (млрд лет) по работе [Геохронология..., 2008])

Ингульский мегаблок Корсунь-Новомиргородский плутон	ЛАГ, км	Восточное Приазовье Октябрьский массив	ЛАГ, км
Расслоенные анортозиты, габбро-анортозиты 1,72—1,76	50	Щелочные сиениты с реликтовым оливином (фаялитом)	50
Жильные нориты, монзониты 1,75	50	Щелочные сиениты, амфибол-пироксеновые 1,79	100
Рапакиви 1,75 Дайковые граниты, пегматиты	20	—	—
Альбититы с ураном	—	Эгирин-альбитовые, нефелиновые сиениты. Мариуполиты	100
—	—	Нефелиновые твейтозиты-сиениты	100

ная) фаза, вероятно, также присутствует.

По меридиональным и субширотным разломным зонам происходит вынесение расплавов из очагов плавления, располагающихся под корой и в коре. Однако сам факт многократного пополнения очага (пульсирующий плюм), вероятно, указывает на значительную глубину их проникновения.

В пределах Кочеровской площади между Звиздаль-Залесской и Брусиловской зонами разломов описаны проявления палеопротерозойского карбонатитового вулканизма, ореолы фенитизации, что, по всей видимости, служило основанием для ее описания как Немировско-Кочеровской шовной зоны в работе [Геолого-геофизическая..., 2008]. Эти разломы образованы 1,85 млрд лет назад [Гинтов, 2014], тогда как шовные зоны образуются ранее — на рубеже архея и протерозоя и отличаются обязательным наличием ЖКС и ЖКК формаций.

В Восточном Приазовье после гранитизации образуется ОМ щелочных пород. Это многофазный массив, а не расслоенная интрузия, так как в процессе кристаллизационной дифференциации остаточный расплав обогащается кремнеземом, тогда как в ОМ от ранних фаз к поздним увеличивается щелочность и глиноземистость, а содержание кремнезема сокращается. В состав ОМ входят ультрабазиты, плагиоклазовые пироксениты, щелочные сиениты с реликтовым фаялитом, т. е. породы, расплавы которых дифференцированы в разных окислительно-восстановительных обстановках. На заключительных этапах его формирования образуются нефелиновые сиениты и мариуполиты (эгирин-альбитовые нефелиновые сиениты), что обязательно связано не только с пополнением глубинного источника, но и с увеличением глубины его размещения.

**Минеральный состав.** Метаморфические породы тетеревской серии представ-

**Таблица 6. Предполагаемая корреляция стратиграфических единиц и гипотетическое протекание плюмовых процессов (изменение размещения ЛАГ) в событии 2,3–1,65 млрд лет назад**

Время, млрд лет назад	ЛАГ, км	Ингульский блок	ЛАГ, км	ОПШЗ, ЧКК	ЗП
1,65	—		100	Щелочные сиениты	
—	20	Альбититы с ураном	—	—	Садовая свита
1,8	20 ↑ 50	КНП Граниты рапакиви Анортозиты, габбро	50	Бефориситы, фоскориты Оливинит- мельтейгиты	
—	100 ?		50	Альвикиты-ийолит- мельтейгиты	
2,0	20 20 ↑ 50	Кировоградские граниты Граниты НУМ Габбро-монзониты	20 50	Щелочные граниты  Твейтозит- пироксениты, щелочные сиениты	Дибровская свита
—	100	—	100	Эссекситы Канадиты Севиты	
2,3	150 200	—	150 200	Щелочные пироксениты	

лены высокоглиноземистыми разновидностями с карбонатом и графитом. Фиксируется широкое развитие карбонатных толщ, сложенных доломитом и кальцитом, присутствие только этому плюмовому событию.

В состав габбро НУМ входят высокожелезистые пироксены, основные плагиоклазы, ильменит. Монцониты сложены кварцем, плаггиоклазом и калиевым полевым шпатом. В составе палингенных гранитов помимо плагиоклаза впервые велика доля калиевого полевого шпата (до 60 %). В составе массивов КП и КНП анортозиты составляют 70—80 % основных пород, представлены породы, сложенные лабрадором. Некоторые разновидности содержат до 13 % ильменита и до 10 % апатита. Развит железистый оливин (f 99). Не менее экзотична структура и текстура пород. В анортозитах наблюдается расслоенность и разделение на фазы. В гранитах рапакиви часты овоиды микроклина, иногда окруженные альбитовыми каймами. И в ИМБ, и в ВМБ граниты рапакиви сопровождаются литий-фтористыми гранитами. В ИМБ распространены редкометалльные пегматиты со сподуменом, петалитом, а также пегматиты с U-Ta-Nb минерализацией и урановородные альбититы. В ВМБ пегматиты содержат кристаллы берилла и топаза. Содержание флюорита на отдельных участках достигает 35—56 %, берилла 0,5 %. Присутствуют молибден-вольфрамовые диопсидовые скарны, оловоносные гранат-диопсидовые скарны, танталоносные пегматиты, мусковит-микроклиновые пегматиты с Li, Rb, Cs минерализацией. В ВМБ залегают россыпные месторождения ильменита промышленного масштаба.

Оливины перидотитов и габбро ОМ — хризолит и марганцовистый фаялит, присутствуют титан-авгит и ортопироксены. В нефелиновых сиенитах содержится до 30 % нефелина, эгирин и гастингсит. В породах развиты содалит и канкринит, бритолит, пирохлор, бадделеит, бастнезит и другие минералы-концентраторы редких и рассеянных элементов. Циркон, сфен, флюорит являются акцессорными минералами.

**Химический состав пород.** В метамор-

фических толщах впервые появляются мощные карбонатные пачки. Магматические породы массивов габбро-монцонитов характеризуются повышенными содержаниями титана, глинозема, двухвалентного железа, кальция и щелочей. С этими магматическими комплексами связаны месторождения золота и титана.

Существенную часть территории УЩ слагают неперемещенные граниты с микроклином.

Литий-фтористые граниты и редкометалльные пегматиты обогащены элементами, способными изоморфно замещать калий (Li, Rb) и переносимыми в виде фторидных комплексов (Nb, Ta). После гранитизации образуются альбититы с ураном, что свидетельствует о повышении доли натрия в гидротермальных растворах. Уран активен в составе карбонатных комплексов, но для образования уранитита и браннерита необходимо его восстановление в присутствии воды. Такие месторождения, образующиеся при смешении карбонатно-фторидно-натриевых флюидов и водных фторидно-калиевых, окружают массивы и плутоны.

Карбонатиты и ореолы фенитизации формирующиеся в западной части щита накануне гранитизации и после нее, связаны с активностью карбонатных (фторидно-карбонатно-натриевых флюидов).

Химический состав пород мариуполитовой группы ОМ своеобразен. Они являются наиболее богатыми щелочами (сильно пересыщены  $\text{Na}_2\text{O}$  (9—12 мас. %) и  $\text{K}_2\text{O}$  (1—5 мас. %)). На заключительных этапах появляются альбит-содалитовые метасоматиты. Их образование связано с остаточными расплавами и растворами с  $\text{SO}_3$  (до 0,25 мас. %), F (до 0,35 мас. %), Cl (до 0,4 мас. %). Характерно обогащение Zr, Nb, TR (Ce), Sc, Th, Mo и др.

Минеральный и химический состав пород блоков свидетельствует о высокой активности углекислого флюида, появляющегося накануне гранитизации. Сама гранитизация возможна только при участии водных флюидов с хлором. Фиксируется влияние хлоридно-калиевых флюидов,

Т а б л и ц а 7. Сопоставление проявлений активизаций (доплюмовых и плюмовых событий)

Активизация	Магматические породы	Граниты (непермещенные)	Метаморфические осадочные породы	Структура	Железистые породы	Черные сланцы
3,8—3,3	Перидотиты, амфиболиты	Эндербиты Грантодиорит-тоналит-трондземиты	—	—	—	—
3,2—2,8	Коматииты (серпентиниты), амфиболиты (спилиты) ЗКС	Тоналиты, трондземиты, гранодиориты (ТТГ формация)	Хлорит-актинолитовые сланцы, карбонатные пласты: брейнериты. Эпидот-карбонат-кварц-биотит-хлоритовые сланцы	Гранитоидные купола с включениями амфиболитов и амфибол-биотитовых гнейсов, окруженные ЗКС	Вулканогенно-сланцевая формация	Отсутствуют
2,7—2,3	Пикриты измененные и амфиболиты	Плагиограниты и кварцевые граниты (2,45), мало распространены	Биотит-гиперстеновые, амфиболовые, амфибол-биотитовые, гранат-биотитовые и гранат-кордиерит-биотитовые гнейсы	Выделение шовных зон (2,65—2,45 млрд лет назад), разделение на мегаблоки и шовные зоны	Железисто-кремнисто-сланцевая формация	Появляются
2,3—1,65	Массивы габбро-монцитов-трахитоидных гранитов Амфиболиты Ультрабазиты Карбонатиты Массивы анортитов-гранитов рапакиви	Микроклиновые граниты (2,0)	Мраморы, кальцифиры, графит-биотитовые, гранат-биотитовые, пироксеновые гнейсы с кордиеритом, симмантином, кристаллосланцы биотит-амфиболовые, амфиболиты	Образование разломных зон, горизонтальные и вертикальные движения большой амплитуды. Разломно-блоковая структура	Железисто-кремнисто-карбонатная формация	Широко развиты

проявленное в обилии микроклина. После гранитизация активны щелочные карбонатно-фторидно-натриевые флюиды.

**Территории, пространственно тяготеющие к шовным зонам.** Их расположение на данном этапе исследования оценивается по ареалам распространения ЖКК формации. Первая территория тяготеет к ГШЗ, но захватывает Хащевато-Завальевский блок и продолжается на север, в РТМБ, где находятся месторождения Одесско-Белоцерковского железорудного района. Ко второй относится часть ИКШЗ — ККЗ. Третья охватывает, часть СПМБ (Конкско-Белозерскую структуру), северную часть ОПШЗ, распространяется на все Западное Приазовье и Мангушский блок. Возможно, эта конфигурация существовала уже в предыдущей активизации, так как породы ЖКС формации присутствуют не только в Гуляйпольской структуре и Корсакском блоке, но и в Сорокинской структуре.

**Метаморфическая толща.** Взаимоотношения с более ранними толщами отчетливо устанавливаются в гданцевской свите криворожской серии. Она состоит из железисто-карбонатных пород (сидерит-кальцитовых, кварц-кальцитовых и др.), безрудных кварцитов, полосчатых железистых силикатно-магнетитовых и магнетитовых руд. На них залегают кальцитовые и кальцит-доломитовые мраморы, слюдистые сланцы и ультрабазиты, полосчатые силикатно-магнетитовые кварциты, глиноземистые и слюдисто-графитовые сланцы. Выше размещаются ультрабазиты и слюдистые метапелитовые и метаалевролитовые сланцы и силикатно-магнетитовые кварциты (описание приведено по работам [Железисто-кремнистые..., 1978; Стратиграфические..., 1985]). Очевидна резкая смена тектонического режима, которая отражается в составе метаморфических пород. После гранитизации образуется глееватская свита. Отличительные особенности ее состава — широкое развитие метапесчаников, метаконгломератов, кварцитов. Резко возрастает доля обломочных пород, что однозначно объясняется тектоническими движениями, которые

начинаются перед гранитизацией и продолжаются (многократно возобновляются) после 2,0 млрд лет.

В бугской серии ГШЗ наряду с высокоглиноземистыми породами и кристаллосланцами широко развиты мраморы и кальцифиры, которые ассоциируют с графит-биотитовыми, гранат-биотитовыми, биотитовыми и пироксеновыми гнейсами, а также железистыми кварцитами. Перемежаются с пироксеносодержащими гнейсами и кристаллосланцами. Породы сходного состава образуют дибровскую (нижнюю) и садовую (верхнюю) свиту в Западном Приазовье.

Как метаморфические породы в ГШЗ описаны гондиты, залегающие среди глиноземистых гнейсов и дупироксеновых кристаллосланцев [Щербаков, 2005]. Они сложены оксидами марганца, родонитом, спессартином и глинистым веществом.

**Железистые породы** гданцевской свиты относятся к ЖКК формации, которая также представлена ГШЗ и ПМБ. В составе гданцевской свиты ККЗ, вскрытой скважиной СГ-8, описаны графитит-андалузит-биотитовые и графит-гранат-биотитовые сланцы, графит-силлимантит-битотитовые гнейсы и доломит-кальцитовые мраморы с диопсидом, флогопитом, актинолитом и сфеном, а также графитит-кальцит-доломитовые мраморы — совокупность обогащенных глиноземом и карбонатных пород, сложенных кальцитом и доломитом. Важным признаком является и широкое развитие графита. Общая мощность гданцевской свиты — 350 м. Значительно больше мощность глееватской свиты — 1,5 км, в которой шире представлены конгломераты и песчаники. Возраст этих свит 1,89—2,0 млрд лет [Криворожская..., 2011]. Согласно работам [Глубинное..., 2010; Железисто-кремнистые..., 1991], формирование гданцевской и глееватской свит в ИКШЗ, а также оскольской свиты в КМА, относящихся к ЖКК формации, начинается после 2,2 и продолжается до 2,05—1,9 млрд лет назад.

В ГШЗ и Хащевато-Завальевском блоке железные руды силикат-магнетитовые

и карбонат-магнетитовые [Ярошук, 1983]. Возраст эвлизитов села Завалье — 1,91 млрд лет [Геохронология..., 2008]. Среди силикат-магнетитовых преобладают железистые кварциты (итабириты) в центре пластов, которые в местах выклинивания сменяются кварц-силикатными глиноземисто-железисто-кремнистыми сланцами. Подобные руды представлены в РТМБ и Западном Приазовье, где пачки, содержащие железистые пласты, залегают в полях развития гранитов и мигматитов. Карбонат-магнетитовые руды ГШЗ состоят из оливина, магнетита и карбоната, содержат пироксены, амфиболы, серпентин, флогопит и шпинель. Карбонаты — кальцит и доломит, оливин — форстерит.

Восстановление первичного генезиса пород ЖКК формации Хащевато-Завальевского района Побужья и ГШЗ неоднозначно вследствие сложности геологического строения. Одним из наиболее важных и нерешенных вопросов является более детальное разделение неоархейского и палеопротерозойского событий. На поверхности находятся породы, много раз подвергавшиеся метаморфическим преобразованиям в условиях гранулитовой фации и продукты неоднократного анатектического плавления [Венидиктов 1986, Щербачков, 2005]. По мнению автора, карбонат-магнетитовые руды с оливином Молдовского месторождения — эруптивные брекчии. Подобное мнение высказано и в работе [Ентин и др., 2015].

Сходство железистых пород ГШЗ и ККЗ наблюдается в общем химическом составе. Оно не абсолютное. Соотношение кремнезема и карбоната в ККЗ несколько сдвинуто в сторону преобладания кремнезема, существенно меньше степень наложенного метаморфизма. Однако общий состав, широкое развитие доломита и кальцита, перемежающихся с кварцитами, в том числе железистыми, широкое развитие пород, обогащенных глиноземом, графита, а также тесная связь с ультрабазитами — особенности, присущие исключительно ЖКК формации.

Породы гданцевской свиты несомненно осадочные, но, по мнению автора, эксга-

ляциянная (хемогенная и туфовая) составляющая осадочных пород откладывается из глубинного флюида, вулканического стекла и пепла на дне морского бассейна. Другими словами, породы гданцевской свиты ККЗ представляют собой эксгаляционные осадки и вулканогенные магматические породы, которые по проницаемым зонам выносятся на поверхность, а затем подвергаются уплотнению и метаморфическим преобразованиям. При метаморфизме пород гданцевской свиты в условиях, соответствующих гранулитовой фации, могли образоваться породы, сходные с ЖКК формацией ГШЗ. Однако оливин не может образоваться при метаморфизме в *PT*-условиях коры, что указывает на другой способ вынесения расплавов, флюидов и ксенокристаллов из слоев плавления близкого состава. В случае ККЗ карбонатно-хлоридно-силикатные флюиды, обогащенные железом, выносятся сначала вместе с расплавом, а затем концентрируются в гидротермальных растворах, которые разгружаются на дне морского бассейна. В Среднем Побужье отделяются непосредственно от слоя плавления в виде карбонатно-силикатных флюидов-расплавов с ксенокристаллами (оливин, диопсид и др.), образуя на поверхности эруптивные брекчии. В Западном Приазовье в это время образуется Черниговский комплекс карбонатитов (магматический) и железистые породы дибровской свиты аналогичного состава и строения.

**Магматические породы.** В ГШЗ в этом плюмовом событии широко представлены ультрабазиты, состав которых близок к коматиитовому стандарту (содержание MgO ~22—32 %, FeO<sub>t</sub> ~10 %, SiO<sub>2</sub> ~40 %). Возраст пород Капитанского массива является предметом дискуссии, однако автор согласен с мнением, высказанным в работе [Геолого-геофизическая..., 2008], — 2,0 млрд лет. В отличие от коматиитов ЗКС в них нет хлорита, они находятся в ассоциации с глиноземистыми кварцитами с силлиманитом, кордиеритом, гранатом, гиперстеном, сульфидами и апоперидитовыми офикальцифирами. Ассоциа-



ция с хромитовыми рудами указывает на глубинный источник расплава (высокий окислительный потенциал), тогда как кристаллизация происходила при высоком потенциале  $\text{CO}_2$ , а не воды, что характерно только для этого времени.

Их появление может быть синхронно с появлением мельтейгитов Черниговского комплекса карбонатитов (ЧКК) в Западном Приазовье. В нем присутствуют карбонатиты и ультращелочные ультрабазиты, которые ассоциируют с породами, образованными из фторидно-глиноземнистых, фосфатных и других флюидов-расплавов. Карбонатиты на 90 % сложены кальцитом и доломитом, в отдельных разновидностях пород доля оливина достигает 25 %, магнетита — 20 % (в бефорситах). Все силикатные породы содержат нефелин. Они образованы при разделении расплава на две (и более) несмешиваемые фазы. Присутствуют фоскориты, породообразующим минералом которых является апатит.

**Особенности минерального и химического состава**, как и на блоках, отражены в существенной доле карбонатных пород, сложенных доломитом и кальцитом, а также в широком развитии кварцитов, углистых сланцев и графитовых гнейсов. Для территорий, пространственно тяготеющих к шовным зонам, характерны вулканы ультраосновного (коматиитового), щелочно-ультраосновного состава и карбонатиты. В ЧКК фосфаты образуют собственную «магматическую» фазу, а в ГШЗ присутствуют гондиты, в которых содержание  $\text{MnO}$  составляет 32 %. Активность (высокие концентрации)  $\text{CO}_2$  и  $\text{F}$  — определяют состав акцессорной минерализации ЧКК, набор редких элементов, которыми обогащены обе фазы.  $\text{Ca}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{a}$ ,  $\text{Ce}$  экстрагируются преимущественно в карбонатную фазу в щелочной среде.  $\text{Zr}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{TR}$  ( $\text{Ce}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Nd}$ ) могут попасть в расплав только вследствие растворения в присутствии  $\text{HF}$  и образования комплексных соединений с фтором, в составе которых они и переносятся к кровле астеносферы. В породах ЧКК породообразующими являются щелочные пироксены и амфи-

болы, альбит, нефелин, кальцит, апатит, магнетит, ильменит. Среди акцессорных помимо графита и сфена присутствуют гатчетолит, ниобиевый рутил, монацит, циркон, пироксид, колумбит, цериевый фергюссонит, бадделейт.

В это время образуются месторождения графита, а углеводороды в виде жидких включений представлены в магматических породах ЧКК.

В ЧКК и ОМ активны элементы, подвижные в составе фторидных комплексов в присутствии  $\text{CO}_2$ . Присутствие нефелина отражает дефицит кремнезема и воды в магматических расплавах, образующихся после гранитизации. Наблюдается обратная корреляция поведения железа и кальция, которые концентрируются в карбонатной фазе, и прямая — глинозема и натрия, активных в присутствии фтора. Дифференциация расплавов в щелочной среде приводит к снижению количества  $\text{MgO}$  (до 14 мас. %) даже в ультраосновных (щелочно-ультраосновных) расплавах.

**Тектонический режим.** Целью данной работы является выявление и сопоставление особенностей проявления плюмовых событий. Однако можно обозначить самые очевидные следствия.

Это плюмовое событие характеризуется совершенно специфическим тектоническим режимом «пульсирующего плюма» [Гинтов, 2014] с постоянно возобновляющейся магматической и гидротермальной активностью. Он проявлен как на блоках, так и в шовных зонах.

Во время гранитизации слой, содержащий расплав, существовал под всем щитом (кроме СПМБ?). Кристаллическая часть коры представляла собой жесткие блоки, разделенные разломами, под которыми на глубине не более 20 км размещался слой плавления. Каждый современный мегаблок состоял из нескольких блоков. На запад и восток от СПМБ эти блоки находились над слоем частичного плавления, мощность которого была близка (превышала) мощность самих блоков. Блоки и шовные зоны были разделены разломами, уходящими глубоко в мантию, что предпо-

лагают их относительную подвижность. В современном строении УЩ отчетливо проявлена плейт-тектоническая составляющая этого плюмового события: спрединг по разломной зоне Херсон—Смоленск и субдукция и смятие вплоть до образования чешуй в ИКШЗ и ГШЗ [Гинтов, 2014]. Движение плит длится от 2,0 до 1,65 млрд лет, а суммарные за активизацию вертикальные и горизонтальные смещения блоков составляют 20 км [Щербаков, 2005].

**Состав глубинных флюидов.** Накануне и в процессе глобальной гранитизации палеопротерозоя отчетливо проявлено влияние водных хлоридно-калиевых флюидов с нейтральной и слабощелочной реакцией. В это время образуются и карбонатные пачки, что свидетельствует о несмесимости. Однако еще более специфические комплексы пород появляются после гранитизации. В массивах анортзитов одна фаза обогащена карбонатным (гидрокарбонатным) с фтором и натрием флюидом (в нее из расплава экстрагируется глинозем), другая — водным (с хлором, кальцием и калием) флюидом, кальций (его часть) и кремнезем остаются в водно-силикатном расплаве. Однако в составе самих массивов и сопутствующих пегматитах и метасоматитах не фиксируется резкого разделения на фазы вследствие несмесимости, хотя по многим признакам устанавливается присутствие карбонатных и фторидно-натриевых флюидов. Предполагается, что под корой и в коре происходит смешение остаточных и глубинных расплавов и флюидов.

В шовных зонах процесс протекает иначе. На начальных этапах (накануне и в процессе гранитизации) происходит вынесение водно-хлоридно-калиевых (с кремнеземом) растворов-флюидов, обогащенных железом. Одновременно присутствуют и карбонатно-фторидно-натриевые, что приводит к разделению на несколько несмесимых фаз. Образование карбонатных осадочных толщ и формирование ЧКК начинается до гранитизации. Однако доля водных хлоридно-силикатных флюидов еще существенна, так как желе-

зистые пласты — силикат-магнетитовые. После гранитизации в ГШЗ образуются ультрабазиты с хромом, ассоциирующие с кальцифирами. Глубина формирования расплавов, в которых подвижны магний и хром, не менее 250 км. Поступление глубинных расплавов на поверхность происходит многократно. Создается впечатление, что источники вещества (слой плавления, питающий магматизм) располагаются глубже, чем в предыдущей активизации. В ГШЗ образуются не только карбонатные пласты, но и железисто-карбонатные руды. Полностью подтверждается предположение, высказанное в работе [Бордунов, 1983], что содовые растворы и известково-кремнистые эксталяции как спутники карбонатитов являются источником известково-кремнистого осадконакопления, объемы которого намного превосходят интрузивные тела карбонатитов. Карбонат-магнетитовые руды и карбонатиты — следствие деления на несмесимые фазы.

Особенности пород ЧКК и ОМ объясняются не только большим количеством углекислого флюида. Он присутствовал и при дифференциации расплавов ЗКС. Однако тогда не происходило его взрывообразного отделения, так как сопутствующими флюидами были водные с хлором. В рассматриваемом плюмовом событии важнейшим признаком является высокая активность фтора, влияние которого на всех уровнях приводит к появлению собственной фазы, обогащенной натрием и глиноземом, а также появлению нефелина в магматических породах.

На блоках, как и в шовных зонах, после 2,0 млрд лет происходит вынесение глубинных сухих щелочных карбонатных флюидов. Различия в составе магматических комплексов объясняются различием геодинамического процесса. Как и в прошлом событии, под территориями, пространственно тяготеющими к шовным зонам, преобладает вынесение глубинных расплавов и флюидов в короткие промежутки времени, тогда как на блоках происходит многократное пополнение очагов

плавления, располагающихся под корой и в коре.

Резкая смена состава глубинных флюидов фиксируется накануне гранитизации образованием мощных пачек кальцитовых и доломитовых пород. Однако она еще более проявлена после гранитизации. В это время многократно возобновляются тектонические движения. После гранитизации можно проследить различия между западной частью УЩ. В западной на протяжении глубинной разломной зоны, образованной Немировским, Брусилевским и Звиздаль-Залесским разломами, наряду с анортозитами образуются и карбонаты (ореолы фенитизации), как в шовных зонах. С тектоническим швом Херсон—Смоленск связано формирование КНП, тогда как с Грузско-Еланчикской разломной зоной — ОМ, в состав которого входят нефелиновые сиениты и мариуполиты. Это разделение наследуется в девоне при образовании Днепровско-Донецкого авлакогена, где совмещаются Притпятский прогиб, развивающийся как трапповая провинция, рифт Днепровско-Донецкой впадины и складчатая область Донбасса.

**Выводы.** Периодичность, установленная на кратонах мира, отчетливо выражена и на УЩ, а магматические и тектонические процессы, проявленные на поверхности, сопоставляются с глобальными этапами формирования коры и мантии.

Наличие дополнительной информации о составе метаморфических и магматических пород позволяет подтвердить существование общего геодинамического режима до 2,8 млрд лет и отсутствие плюмовых событий и плитовой тектоники до 2,7 млрд лет вследствие пластичного состояния большей части коры и относительно невысокой температуры солидуса мантии, включающей легкоплавкую компоненту. Формирование сублитосферной мантии приходится на период 3,0—2,7 млрд лет назад. В это время происходит и образование коры, состав которой кардинально отличается от состава мантии. Вследствие вынесения базальтоидной компоненты и флюида состав мантии приближается к пе-

ридотиту, а в составе коры увеличивается количество плагиоклаза и кварца.

После 2,7 млрд лет происходит деление территории на два больших блока. Гранитизация в центральной части УЩ проявлена 2,5 млрд лет назад. После этого территория УЩ делится на блоки и шовные зоны. Исключение составляет центральная часть СПМБ.

Состав метаморфических и магматических комплексов, образующихся в плюмовом событии 2,7—2,3 млрд лет назад, а также общее тектоническое строение совершенно отличны от архейских гранит-зеленокаменных областей. Метаморфические толщи блоков и шовных зон имеют сходные особенности. Фиксируется резкое увеличение доли хемогенно (эксталяционно)-осадочных пород относительно вулканогенных, изменение состава магматических комплексов (смена коматиитов пикритами, пород ТТГ формации — плагиогранитами), широкое развитие измененных базальтов (амфиболитов), реже пикритов. Увеличение доли глинозема и появление графита, а также ритмичное строение метаморфических толщ отражает общее снижение окислительного потенциала по сравнению с археем. Но не менее четко обозначаются и различия, главное из которых — присутствие пород ЖКС формации в шовных зонах. В шовных зонах преобладают породы и минералы, образование которых требует более высокого окислительного потенциала, что объясняет подвижность железа и присутствие европия.

Следующий плюмовый процесс проявлен как этап формирования (преобразования) и коры, и мантии на всех кратонах. В строении УЩ обнаружены несомненные признаки плитовотектонических процессов. Максимальные по амплитуде движения происходили 2,0—1,8 млрд лет назад. На всей территории УЩ фиксируется общее снижение окислительного потенциала, щелочность расплавов и флюидов резко возрастает после гранитизации, охватывающей весь щит. Широко представлены карбонатные породы, сложен-

ные кальцитом и доломитом, карбонатиты. Метаморфические преобразования протекают с преобладанием  $\text{CO}_2$  флюидов.

На блоках образуются глубинные разломные зоны, накапливаются эксгальционно-осадочные толщи, массивы монзонитов и калиевых гранитов, с которых начинается образование глобального слоя плавления в коре (2,08—2,04 млрд лет назад). С ними связаны месторождения золота. Формируются массивы анортозитов гранитов рапакиви и связанные с ними месторождения титана, редкометалльных пегматитов, ураноносных альбититов (1,8—1,74 млрд лет назад).

В шовных зонах образуются комплексы карбонатитов, ореолы фенитизации. С ними связана редкометалльная минерализация и включения углеводородов, представлены фосфатные и марганцовистые породы. В них происходит накопление мощных толщ кальцифиров (доломитовых

и кальцитовых). Отличительной чертой этого плюмового события является и появление ультрабазитов, состав которых приближается к коматиитовому стандарту, с которыми связаны хромитовые рудопоявления. В шовных зонах обязательно присутствует ЖКК формация.

Все три выделенные активизации характеризуются совершенно специфическими метаморфическими и магматическими формациями. Наличие трех разновидностей метаморфических толщ, каждой из которых присущи собственные структурно-вещественные характеристики, определяет выделение архейского этапа формирования гранит-зеленокаменных областей до 2,8 млрд лет и двух плюмовых событий в период 2,7—1,65 млрд лет. Эти события проявлены на всех кратонах мира и зафиксированы как этапы образования и преобразования не только поверхности, но также нижней коры и верхней мантии.

### Список литературы

- Артеменко Г. В. Новые геохронологические данные по Сурской зеленокаменной структуре. *Минерал. журн.* 1998. Т. 20. № 2. С. 74—81.
- Беляцкий Б. В., Родионов Н. В., Антонов А. В., Сергеев С. А. Цирконы с возрастными показателями процессов в древнейшей континентальной коре восточно-Антарктического щита (Земля Эндерби). *Доклады РАН.* 2011. Т. 438. № 4. С. 510—514.
- Бобров О. Б., Степанюк Л. М., Сергеев С. А., Пресняков С. Л. Метатоналіти дніпропетровського комплексу та вікові етапи їх формування (геологічна позиція, склад, результати Shrimp радіології). *Збірка наукових праць УкрДГРІ.* 2008. № 1. С. 9—24.
- Богатиков О. А., Коваленко В. И., Шарков Е. В. Магматизм, тектоника и геодинамика Земли: Связь во времени и в пространстве. Москва: Наука, 2010. 606 с.
- Бордунов И. Н. Криворожско-Курская эвгеосинклиналь. Киев: Наук. думка, 1983. 304 с.
- Венидиктов В. М. Полициклическое развитие гранулитовой фации. Киев: Наук. думка, 1986. 267 с.
- Верхогляд В. М., Скобелев В. М. Изотопный возраст субвулканизма района г. Новоград-Вольнский (северо-западная часть Украинского щита). *Геохимия и рудообразование.* 1995. Вып. 21. С. 47—56.
- Геология осадочно-вулканогенных формаций Украинского щита. Под ред. Н. П. Семененко. Киев: Наук. думка, 1967. 380 с.
- Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита. Под ред. А. В. Анциферова. Донецк: Вебер, 2008. 308 с.
- Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Архей. Под ред. Н. П. Щербака. Киев: Наук. думка, 2005. 244 с.
- Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. Под ред. Н. П. Щербака. Киев: Наук. думка, 2008. 240 с.
- Гинтов О. Б. Схема периодизации этапов раз-

- ломообразования в земной коре Украинского щита — новые данные и следствия. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 1. С. 3—18.
- Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. Т. 2. Гл. ред. серии А. Ф. Морозов. Москва: ГЕОКАРТ:ГЕОС, 2010. 400 с.
- Ентин В. А., Гинтов О. Б., Мычак С. В., Юшин А. А. Структура Молдавского железорудного месторождения (Украинский щит) по геолого-геофизическим данным и его возможная эндогенная природа. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 4. С. 3—18.
- Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Генезис железных руд. Отв. ред. В. М. Кравченко, Д. А. Кулик. Киев: Наук. думка, 1991. 216 с.
- Железисто-кремнистые формации Украинского щита. Т. 1. Отв. ред. Н. П. Семененко. Киев: Наук. думка, 1978. 328 с.
- Каулина Т. В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. 144 с.
- Криворожская сверхглубокая скважина СГ-8. Под ред. Е. М. Шеремета. Донецк: Ноулидж, 2011. 555 с.
- Кутас Р. И. Тепловая эволюция и формирование докембрийской земной коры. *Збірка наук. праць: Еволюція докембрійських гранітоїдів і пов'язаних з ними корисних копалин у зв'язку з енергетикою Землі та етапами її тектоно-магматичної активізації.* Київ: УкрДГРІ, 2008. С. 90—96.
- Литасов К. Д., Шацкий А. Ф. Состав и строение ядра Земли Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016, 304 с.
- Лобач-Жученко С. Б. Древние кратоны — возраст, строение, состав, геодинамика. *Минерал. журн.* 2014. Т. 36. № 2. С. 61—70.
- Лобач-Жученко С. Б., Степанюк Л. М., Пономаренко А. Н., Балаганский В. В., Сергеев С. А., Пресняков С. Л. Возраст цирконов из эндербито-гнейсов Среднего Побужья (Днестровско-Бугский мегаблок Украинско-го щита). *Минерал. журн.* 2011. Т. 33. № 1. С. 3—14.
- Лобач-Жученко С. Б., Балаганский В. В., Балтыбаев Ш. К., Степанюк Л. М., Пономаренко А. Н., Лохов К. И., Корешкова М. Ю., Юрченко А. В., Егорова Ю. С., Сукач В. В., Бережная Н. Г., Богомолов Е. С. Этапы формирования побужского гранулитового комплекса по данным изотопно-геохронологических исследований (Среднее Побужье, Украинский щит). *Минерал. журн.* 2013. Т. 35. № 4. С. 86—98.
- Лобковский Л. И., Никишин А. М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики Москва: Науч. мир, 2004. 611 с.
- Металлические и неметаллические полезные ископаемые Украины. Т. 1. Металлические полезные ископаемые. Под ред. Н. П. Щербака. Киев-Львов: Центр Европы, 2005. 785 с.
- Орса В. И. Гранитообразование в докембрии Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области. Киев: Наук. думка, 1988. 202 с.
- Пашкевич И. К., Бакаржиева М. И. Мафические дайки Ингульского мегаблока (Украинский щит): связь поверхностных и глубинных структур литосферы, разломная тектоника и геодинамика. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 5. С. 49—66.
- Петрологія і геохімія чарнокитоїдів Українського щита. Відп ред. О. М. Пономаренко. Київ: Наук. думка, 2011. 216 с.
- Пономаренко А. Н., Степанюк Л. М., Шумлянский Л. В. Геохронология и геодинамика палеопротерозоя Украинского щита. *Минерал. журн.* 2014. Т. 36. № 2. С. 48—58.
- Рябчиков И. Д., Когарко Л. Н. Физико-химические параметры материала глубинных мантийных плюмов. *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57. № 5. С. 874—888. doi: 10.15372/GiG20160504.
- Семененко Н. П. Кислородно-водородная модель Земли. Киев: Наук. думка, 1990. 248 с.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Шумлянская Л. А. Геофлюиды и современное проявление активизации Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 5. С. 2—25.

- Стратиграфические разрезы докембрия Украинского щита.* Под ред. К. Е. Есипчука. Киев: Наук. думка, 1985. 168 с.
- Ультрабазитовые формации центральной части Украинского щита.* Под ред. Н. П. Семененко. Киев: Наук. думка. 1979. 412 с.
- Усенко О. В. Формирование расплавов: геодинамический процесс и физико-химические взаимодействия. Киев: Наук. думка, 2014. 240 с.
- Усенко О. В. Эволюция расплавов и флюидов в процессе формирования коры и мантии в палеопротерозое (2,2—1,75 млрд лет назад). Стратиграфия и магматизм. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 2. С. 56—95. doi: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i2.2017.97383>.
- Усенко О. В. Эволюция расплавов и флюидов как отражение формирования коры и мантии на примере Среднеприднепровского мегаблока Украинского щита. Архей. *Геофиз. журн.* 2016а. Т. 38. № 2. С. 35—56. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i2.2016.107764>.
- Усенко О. В. Эволюция расплавов и флюидов в процессе формирования коры и мантии в неоархее—палеопротерозое. Стратиграфические следствия. *Геофиз. журн.* 2016б. Т. 38. № 6. С. 40—63. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91961>.
- Шацкий В. С., Бузлукова Л. В., Ягоуц Э., Козменко О. А., Митюхин С. И. Строение и эволюция нижней коры Далдын-Алакитского района Якутской алмазонасной провинции (по данным изучения ксенолитов). *Геология и геофизика.* 2005. Т. 46. № 12. С. 1273—1289.
- Щербаков И. Б. Петрология Украинского щита. Львов: ЗукЦ, 2005. 366 с.
- Ярошук М. А. Железорудные формации Белоцерковско-Одесской металлогенической зоны. Киев: Наук. думка, 1983. 224 с.
- Arndt N., Lesher C. M., 2004. Komatiite. In: *Encyclopedia of Geology.* Elsevier, P. 260—268.
- Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapež B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J., 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology* 105(3), 467—508. doi:10.2113/gsecongeo.105.3.467.
- Belousova E. A., Kostitsyn Y. A., Griffin W. L., Begg G. C., O'Reilly S. Y., Pearson N. J., 2010. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos* 119, 457—466. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.024>.
- Boyd F. R., Pearson D. J., Hoal K. O., Hoal B. J., Nixon P. H., Kingston M. J., Mertzman S. A., 2004. Garnet lherzolites from Louwrensia, Namibia: bulk composition and P/T relations. *Lithos* 77, 573—592. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.010>.
- Campbell I. H., Griffiths R. W., 2014. Did the formation of D" cause the Archaean-Proterozoic transition? *Earth Planet. Sci. Lett.* 388, 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.048>.
- Carlson R. W., Pearson D. G., James D. E., 2005. Physical, chemical and chronological characteristics of continental mantle. *Rev. Geophys.* 43, RG1001, 1—24. <http://dx.doi.org/10.1029/2004RG000156>.
- Cavosie A. J., Valley J. W., Wilde S. A., 2007. The oldest terrestrial mineral record: A review of 4400 to 4000 Ma detrital zircons from the Jack Hills, Western Australia. In: M. J. van Kranendonk, R. H. Smithies, V. C. Bennett (eds.) *Earth's Oldest Rocks: Developments in Precambrian Geology.* Vol. 15. London: Elsevier, P. 91—111.
- Condie K. C., 2011. Earth and evolving planetary system. Elsevier, 574 p.
- Condie K. C., Davaille A., Aster R. C., Arndt N., 2015. Upstairs-downstairs: supercontinents and large igneous provinces, are they related? *Int. Geol. Rev.* 57, 1341—1348. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.963170>.
- Ernst R. E., Buchan K. L., 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 469—523. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.145500>.
- Ernst W. G., Sleep N. H., Tsujimori T., 2016. Plate-tectonic evolution of the Earth: bottom-up and top-down mantle circulation. *Can. J. Earth Sci.* 53, 1103—1120. [dx.doi.org/10.1139/cjes-2015-0126](http://dx.doi.org/10.1139/cjes-2015-0126).
- Glikson A. Y., 1993. Asteroids and early Precambrian crustal evolution. *Earth Sci. Rev.* 35, 285—319. doi: 10.1016/0012-8252(93)90041-5.
- Green D. H., Falloon T. J., Eggins S. M., Yaxley G. M., 2001. Primary magmas and mantle tem-

- peratures. *Eur. J. Mineral.* 13, 437—451. doi: 10.1127/0935-1221/2001/0013-0437.
- Green D. H., Hibberson W. O., Kovács I., Rosenthal A., 2010. Water and its influence on the lithosphere–asthenosphere boundary. *Nature* 467, 448—452. doi:10.1038/nature09369.
- Griffin W., Belousova E., O'Neill C., O'Reilly S. Y., Malkovets V., Pearson N., Spetsius S., Wilde S., 2014. The world turns over: Hadean—Archean crust—mantle evolution. *Lithos* 189, 2—15. doi: 10.1016/j.lithos.2013.08.018.
- Harrison T. M., Schmitt A. K., McCulloch M. T., Lovera O. M., 2008. Early (>4,5 Ga) Formation of Terrestrial Crust: Lu-Hf, 18O/16O, and Ti Thermometry Results for Hadean Zircons. *Earth Planet. Sci. Lett.* 268(3-4), 476—486. doi: 10.1016/j.epsl.2008.02.011.
- Herzberg C., Asimow P. D., Arndt N., Niu Y., Leshner C. M., Fitton J. G., Cheadle M. J., Saunders A. D., 2007. Temperatures in ambient mantle and plumes: constraints from basalts, picrites and komatiites. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 8(2), 1—34. doi:10.1029/2006GC001390.
- Herzberg C., Rudnick R., 2012. Formation of cratonic lithosphere: An integrated thermal and petrological model. *Lithos* 149, 4—15. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.01.010.
- Hiess J., Bennett V. C., Nutman A. P., Williams I. S., 2009. In situ U-Pb, O and Hf isotopic compositions of zircon and olivine from Eoarchaeon rocks, West Greenland: New insights to making old crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 4489—4516. doi:10.1016/j.gca.2009.04.019.
- Hinrichs K. U., 2002. Microbial fixation of methane carbon at 2,7 Ga: Was an anaerobic mechanism possible? *Geochem. Geophys. Geosyst.* 3(7), 1—10. doi: 10.1029/2001GC000286.
- Hofmann H. J., Grey K., Hickman A. H., Thorpe R. I., 1999. Origin of 3,45 Ga coniform stromatolites in Warrawoona Group, Western Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.* 111, 1256—1262. doi: 10.1130/0016-7606(1999)111<1256:OOGCSI>2.3.CO;2.
- Holden P., Lank P., Ireland T. R., Harrison T. M., Foster J. J., Bruce Z., 2009. Mass-spectrometric mining of Hadean zircons by automated SHRIMP multi-collector and single-collector U/Pb zircon age dating: The first 100,000 grains. *Int. J. Mass Spectrom.* 206, 53—63. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijms.2009.06.007.
- Holland H. D., 2002. Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, 3811—3826.
- Ionov D. A., Carlson R. W., Doucet L. S., Golovin A. V., Oleinikov O. B., 2015. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re-Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 428, 108—119. doi: 10.1016/j.epsl.2015.07.007.
- Isley A. E., Abbott D. H., 2002. Implication for the temporal distribution of high-Mg magmas for mantle plume volcanism through time. *J. Geol.* 110, 141—158.
- Klein C., 2005. Some Precambrian banded iron formation (BIFs) from around the world: their age, geological setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin. *American Mineralogist* 90, 1473—1499. doi: 10.2138/am.2005.1871.
- Koreshkova M. Yu., Downes H., Nikitina L. P., Vladyskin N. V., Larionov A. N., Sergeev S. A., 2009. Trace element and age characteristics of zircons in granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Siberia. *Precambrian Res.* 168, 197—212. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.09.007.
- Liu J., Riches A. J. V., Pearson G., Luo Y., Kienlen B., Kjarsgaard B. A., Stachel Th., Armstrong J. P., 2016. Age and evolution of the deep Continental root beneath the central Rae craton, northern Canada. *Precambrian Res.* 272, 168—184. http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2015.11.001
- Liu D. Y., Nutman A. P., Compston W., Wu J. S., Shen Q. H., 1992. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese Part of the Sino-Korean craton. *Geology* 20, 339—342. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0339:ROMCIT>2.3.CO;2
- Lobach-Zhuchenko S. B., Balagansky V. V., Baltybaev Sh. K., Bibikova E. V., Chekulaev V. P., Yurchenko A. V., Arestova N. A., Artemenko G. V., Egorova Yu. S., Bogomolov E. S., Sergeev S. A., Skublov S. G., Presnyakov S. L., 2014. The Orekhov-Pavlograd zone, Ukrainian Shield: Milestones of its evolutionary history and constraints for tectonic models.

- Precambrian Res.* 252, 71—87. doi: 10.1016/j.precamres.2014.06.027.
- Maas R., Kinny P. D., Williams I. S., Froude D. O., Compston W., 1992. The Earth's oldest known crust — a geochronological and geochemical study of 3900—4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 1281—1300. [http: dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90062-N](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90062-N).
- Nebel O., Rapp R. P., Yaxley G. M., 2014. The role of detrital zircons in Hadean crustal research. *Lithos* 190-191, 313—327. doi: 10.1016/j.lithos.2013.12.010.
- Nutman A. P., Friend C., Bennett V. C., 2001. Review of the oldest (4400–3600 Ma) geological and mineralogical record: Glimpses of the beginning. *Episodes* 24(2), 93—101.
- O'Neil J., Carlson R., Paquette J., Francis D., 2012. Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precambrian Res.* 220-221, 23—44. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.07.009>.
- O'Reilly S. Y., Griffin W. L., 2010. The continental lithosphere-asthenosphere boundary: Can we sample it? *Lithos* 120, 1—13. doi:10.1016/j.lithos.2010.03.016.
- Peterson T. D., Pehrsson S., Skulski T., Sandeman H., 2010. Compilation of Sm-Nd Isotope Analyses of Igneous Suites, Western Churchill Province. Geological Survey of Canada, Open File 6439. doi: 10.4095/285360.
- Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., Mazuk-abzov A., Sklyarov E., Todt W., 2005. Multistage magmatic and metamorphic evolution in the Southern Siberian Craton: Archean and Paleoproterozoic zircon ages revealed by SHRIMP and TIMS. *Precambrian Res.* 136, 353—368. doi: 10.1016/j.precamres.2004.12.003.
- Presnal D. C., Gudfinnsson G. H., Walter M. G., 2002. Generation of mid-ocean ridge basalts at pressures from 1 to 7 GPa. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, 2073—2090. doi:10.1016/S0016-7037(02)00890-6.
- Song B., Nutman A. P., Liu D., Wu J., 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res.* 78, 79—94. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00070-4).
- Valley J. W., Peck W. H., King E. M., Wilde S. A., 2002. A cool early Earth. *Geology* 30, 351—354. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0351:ACEE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0351:ACEE>2.0.CO;2).
- Walter M. J., 2005. Melt Extraction and Compositional Variability in Mantle Lithosphere. In: *The Mantle and Core*. Ed. R. W. Carlson. Oxford: Elsevier Ltd. P. 363—394.
- Wyllie P. J., 1977. Effects of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> on magma generation in the crust and mantle. *J. Geol. Soc.* 134, 215—234. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.134.2.0215>.
- Wyllie P. J., Ryabchikov I. D., 2000. Volatile components, magmas, and critical fluids in upwelling mantle. *J. Petrol.* 41(7), 1195—1205. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.7.1195>.

## Periodization and specific features of deep processes in Precambrian by example of the Ukrainian shield

© O. V. Usenko, 2017

Thorough information on geological structure of the Ukrainian shield (USh) allows to verify opinions existing nowadays that plume and plate tectonic activities are possible only after conclusive formation of sublithospheric mantle 2,8—2,55 Ga and plume episodes of Precambrian occurred 2,75—2,7, 2,45—2,4, 1,9, 1,8—1,75, 1,65 Ga ago. It can be proved nowadays that formation of the crust occurred before 4.0 Ga and plume events result in later transformation of not only crust but also of mantle. Isotope dating of the USh allows allocating of plume episodes in close-range time. Nevertheless these limits for the USh in many cases have connection with geological processes, because not detrital zircons are dated but those ones included in rocks. Individual episodes are united into lasting plume events (activations) up to 3,2, 3,2—2,8, 2,7—2,3, 2,3—1,65 Ga.



Special features of the structure of granite-greenstone area of the Middle Dnieper mega-block of the USh support the opinion that before 2,7 Ga thick sub-continental lithosphere consisted of refractory peridotite did not exist. Crystallizable layer consists of relatively low-melt minerals and is enriched by basaltoid component. The thickness of crystallized layer reduces up to 100 and 50 km in case of addition of reheated deep matter and increases during crystallization up to 150—200 km. Asthenosphere compulsory contains the melt diluted by silicate-aqueous-carbonate fluids.

After 2,7 Ga subdivision of the area into two big blocks occurred. At the mark of the Archean and Proterozoic (2,5 Ga ago) the territory of Ukraine was subdivided into blocks and territories which spatially were drawn towards suture zones. The composition of the terrains allows supposing that at the mark of the Archean and Proterozoic exarticulation of tectonic units where plume processes went in different ways occurred.

The following plume event (2,3—2,65 Ga ago) was manifested as a stage of transformation of mantle and crust on all the cratons. In the structure of the USh obvious features of plate tectonic processes have been found. Movements maximal by amplitude occurred 2,0—1,8 Ga ago. During the process of this plume event abrupt change of composition of fluids and melts removed from the mantle occur. Granitization takes place with participation of aqueous chloride-potassium fluids. After granitization active dry carbonate-fluoride-sodium fluids became active. Removal of melts, fluids occurs by small portions and the regime of pulsating plume considerably specifies the composition of magmatic rocks and hydrothermal solutions.

**Key words:** plume event, lithosphere-asthenosphere boundary, crust–mantle evolution, continental lithospheric mantle, banded iron formation, tonalite-trondhjemite-granodiorite formation, komatiite, anorthosites, alkaline igneous rocks.

## References

- Artemenko G. V., 1998. New geochronological data on the Sura greenstone structure. *Mineralogicheskii zhurnal* 20(2), 74—81 (in Russian).
- Belyatskiy B. V., Rodionov N. V., Antonov A. V., Sergeyev S. A., 2011. Zirkons with ages 3.98-3.63 billion years — indicators of processes in the oldest continental crust of the East Antarctic Shield (Enderby Land). *Doklady RAN* 438(4), 510—514 (in Russian).
- Bobrov O. B., Stepanyuk L. M., Sergeyev S. A., Presnyakov S. L., 2008. Metatonalites of Dni-propetrovsk complex and age stages of their formation (geological position, composition, results of Shrimp radiology). *Collection of scientific works of UkrDGRI* (1), 9—24 (in Ukrainian).
- Bogatikov O. A., Kovalenko V. I., Sharkov E. V., 2010. Magmatism, tectonics and geodynamics of the Earth: Relationship in time and space. Moscow: Nauka, 606 p. (in Russian).
- Bordunov I. N., 1983. Krivoy Rog-Kursk eugeosynclines. Kiev: Naukova Dumka, 304 p. (in Russian).
- Venidiktov V. M., 1986. Polycyclic development of granulite facies. Kiev: Naukova Dumka, 267 p. (in Russian).
- Verkhoglyad V. M., Skobelev V. M., 1995. Isotopic age subvolcanic district of Novograd Volyn (northwestern part of the Ukrainian shield). *Geokhimiya i rudoobrazovaniye* (is. 21), 47—56 (in Russian).
- Geology of sedimentary-volcanogenic formations of the Ukrainian shield, 1967. Ed. N. P. Semenenko. Kiev: Naukova Dumka, 380 p. (in Russian).
- Geological and geophysical model Golovanevsk suture zones of the Ukrainian Shield, 2008. Ed. A. V. Antsiferov. Donetsk: Weber, 308 p. (in Russian).
- Geochronology Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Archaea, 2005. Ed. N. Shcherbak. Kiev: Naukova Dumka, 244 p. (in Russian).
- Geochronology Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Proterozoic, 2008. Ed. N. Shcherbak. Kiev: Naukova Dumka, 240 p. (in Russian).

- Gintov O. B., 2014. Scheme of faulting periodization in the Earth's crust of the Ukrainian Shield — new data and consequences. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(1), 3—18 (in Russian).
- Deep structure, evolution and minerals of the Early Precambrian basement of the East European Platform: Interpretation of materials based on the 1-EB profile, profiles 4B and TATSEYS, 2010. Vol. 2. Ch. Ed. series A. F. Morozov. Moscow: GEOKART: GEOS, 400 p. (in Russian).
- Entin V. A., Gintov O. B., Mychak S. V., Yushin A. F., 2015. The structure of the Moldovan iron ore deposit (Ukrainian shield) according geological and geophysical data and its possible endogenous nature. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(4), 3—18 (in Russian).
- Ferruginous-siliceous formations of the Precambrian of the European part of the USSR. The genesis of iron ores, 1991. Ed. V. M. Kravchenko, D. A. Kulik. Kiev: Naukova Dumka, 216 p. (in Russian).
- Ferruginous-siliceous formations of the Ukrainian shield, 1978. Ed. N. P. Semenenko. Vol. 1. Kiev: Naukova Dumka, 328 p. (in Russian).
- Kaulina T. V., 2010. Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes. Apatity: Publ. House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 144 p. (in Russian).
- Krivoy Rog superdeep well SG-8, 2011. Ed. E. M. Sheremet. Donetsk: Noulidzh, 555 p. (in Russian).
- Kutas R. I., 2008. Thermal evolution and formation of the Precambrian earth's crust. *Collection of scientific works: The evolution of Precambrian granitoids and associated minerals in connection with the Earth's energy and the stages of its tectonic-magmatic activation*. Kyiv: UkrDGRI, P. 90—96 (in Russian).
- Litasov K. D., Shatskiy A. F., 2016. Composition and structure of the core of the Earth Novosibirsk: Publ. SB RAS, 304 p. (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko S. B., 2014. Ancient cratons — age, structure, composition, geodynamics. *Mineralogicheskiy zhurnal* 36(2), 61—70 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko S. B., Stepanyuk L. M., Ponomarenko A. N., Balaganskiy V. V., Sergeev S. A., Presnyakov S. L., 2011. Age of zircons from the enderbite-gneisses of the Middle Bug River (the Dniester-Bug megablock of the Ukrainian shield). *Mineralogicheskiy zhurnal* 33(1), 3—14 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko S. B., Balaganskiy V. V., Baltybaev Sh. K., Stepanyuk L. M., Ponomarenko A. N., Lokhov K. I., Koreshkova M. Yu., Yurchenko A. V., Yegorova Yu. S., Sukach V. V., Berezhnaya N. G., Bogomolov E. S., 2013. Stages of the Ust-Luga granulite complex formation from isotope-geochronological data (Middle Pobuzhye, Urkainskiy Shield). *Mineralogicheskiy zhurnal* 35(4), 86—98 (in Russian).
- Lobkovskiy L. I., Nikishin A. M., Khain V. E., 2004. Modern problems of geotectonics and geodynamics. Moscow: Nauchnyy Mir, 611 p. (in Russian).
- Metallic and nonmetallic minerals of Ukraine, 2005. Vol. 1. Metallic minerals. Ed. N. Shcherbak. Kiev-Lvov: Tsent Yevropy, 785 p. (in Russian).
- Orsa V. I., 1988. Granite formation in the Precambrian of the Middle Pridneprovsky granite-greenstone region. Kiev: Naukova Dumka, 202 p. (in Russian).
- Pashkevich I. K., Bakarzhieva M. I., 2016. Mafic dykes of Ingul megablock (Ukrainian Shield): relationship of surface and deep structures of the lithosphere, fault tectonics and geodynamics. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(5), 49—66 (in Russian).
- Petrology and Geochemistry charnockitoids Ukrainian Shield, 2011. Ed. O. M. Ponomarenko. Kiev: Naukova Dumka, 216 p. (in Ukrainian).
- Ponomarenko A. N., Stepanyuk L. M., Shumlyanskiy L. V., 2014. Geochronology and Geodynamics of the Paleoproterozoic of the Ukrainian Shield. *Mineralogicheskiy zhurnal* 36(2), 48—58 (in Russian).
- Ryabchikov I. D., Kogarko L. N., 2016. Physicochemical parameters of the material of deep mantle plumes. *Geologiya i geofizika* 57(5), 874—888 (in Russian). doi: 10.15372/GiG20160504.
- Semenenko N. P., 1990. Oxygen-hydrogen model

- of the Earth. Kiev: Naukova Dumka, 248 p. (in Russian).
- Starostenko V. I., Lukin A. E., Tsvetkova T. A., Shym-lanskaya L. A., 2014. Geofluids and up-to-date display of activation Ingul megablock Ukrainian Shield. *Geofizicheskij zhurnal* 36(5), 2—25 (in Russian).
- Stratigraphic sections of the Precambrian Ukrainian Shield, 1985. Ed. K. E. Esipchuk. Kiev: Naukova Dumka, 168 p. (in Russian).
- Ultrabasic formations of the central part of the Ukrainian shield, 1979. Ed. N. P. Semenenko. Kiev: Naukova Dumka, 412 p. (in Russian).
- Usenko O. V., 2014. Forming Melts: geodynamic processes and physical and chemical interactions. Kiev: Naukova Dumka, 240 p. (in Russian).
- Usenko O. V., 2017. Evolution of melts and fluids in the process of crust and mantle formation in paleoproterozoic (2,2—1,75 billion years ago). *Stratigraphy and magmatism. Geofizicheskij zhurnal* 39(2), 56—95 (in Russian). doi: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i2.2017.97383>.
- Usenko O. V., 2016a. Evolution of melts and fluids as a reflection of the crust and mantle formation by the example of the Middle Dnieper megablock of the Ukrainian Shield. *Archean. Geofizicheskij zhurnal* 38(2), 35—56 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i2.2016.107764>.
- Usenko O. V., 2016b. Evolution of melts and fluids during the crust and mantle formation in Neo-Archean—Paleo-Proterozoic. Stratigraphic effects. *Geofizicheskij zhurnal* 38(6), 40—63 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91961>.
- Shatskiy V. S., Buzlukova L. V., Yagutts E., Kozmenko O. A., Mityukhin S. I., 2005. The structure and evolution of the lower crust of the Daldyn-Alakit district of the Yakut diamondiferous province (according to xenolith study data). *Geologiya i geofizika* 46(12), 1273—1289 (in Russian).
- Shcherbakov I. B., 2005. Petrology of the Ukrainian shield. Lviv: ZuKTs, 366 p. (in Russian).
- Yaroshchuk M. A., 1983. Iron-ore formations of the Belotserkov-Odessa metallogenic zone. Kiev: Naukova Dumka, 224 p. (in Russian).
- Arndt N., Lesher C. M., 2004. Komatiite. In: *Encyclopedia of Geology*. Elsevier, P. 260—268.
- Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapež B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J., 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology* 105(3), 467—508. doi:10.2113/gsecongeo.105.3.467.
- Belousova E. A., Kostitsyn Y. A., Griffin W. L., Begg G. C., O'Reilly S. Y., Pearson N. J., 2010. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos* 119, 457—466. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.024>.
- Boyd F. R., Pearson D. J., Hoal K. O., Hoal B. J., Nixon P. H., Kingston M. J., Mertzman S. A., 2004. Garnet lherzolites from Louwrensia, Namibia: bulk composition and P/T relations. *Lithos* 77, 573—592. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.010>.
- Campbell I. H., Griffiths R. W., 2014. Did the formation of D" cause the Archean—Proterozoic transition? *Earth Planet. Sci. Lett.* 388, 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.048>.
- Carlson R. W., Pearson D. G., James D. E., 2005. Physical, chemical and chronological characteristics of continental mantle. *Rev. Geophys.* 43, RG1001, 1—24. <http://dx.doi.org/10.1029/2004RG000156>.
- Cavosie A. J., Valley J. W., Wilde S. A., 2007. The oldest terrestrial mineral record: A review of 4400 to 4000 Ma detrital zircons from the Jack Hills, Western Australia. In: *M. J. van Kranendonk, R. H. Smithies, V. C. Bennett (eds.) Earth's Oldest Rocks: Developments in Precambrian Geology*. Vol. 15. London: Elsevier, P. 91—111.
- Condie K. C., 2011. Earth and evolving planetary system. Elsevier, 574 p.
- Condie K. C., Davaille A., Aster R. C., Arndt N., 2015. Upstairs-downstairs: supercontinents and large igneous provinces, are they related? *Int. Geol. Rev.* 57, 1341—1348. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.963170>.
- Ernst R. E., Buchan K. L., 2003. Recognizing man-

- tle plumes in the geological record. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 469—523. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.145500>.
- Ernst W. G., Sleep N. H., Tsujimori T., 2016. Plate-tectonic evolution of the Earth: bottom-up and top-down mantle circulation. *Can. J. Earth Sci.* 53, 1103—1120. [dx.doi.org/10.1139/cjes-2015-0126](https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0126).
- Glikson A. Y., 1993. Asteroids and early Precambrian crustal evolution. *Earth Sci. Rev.* 35, 285—319. doi: 10.1016/0012-8252(93)90041-5.
- Green D. H., Falloon T. J., Eggins S. M., Yaxley G. M., 2001. Primary magmas and mantle temperatures. *Eur. J. Mineral.* 13, 437—451. doi: 10.1127/0935-1221/2001/0013-0437.
- Green D. H., Hibberson W. O., Kovács I., Rosenthal A., 2010. Water and its influence on the lithosphere–asthenosphere boundary. *Nature* 467, 448—452. doi:10.1038/nature09369.
- Griffin W., Belousova E., O'Neill C., O'Reilly S. Y., Malkovets V., Pearson N., Spetsius S., Wilde S., 2014. The world turns over: Hadean—Archean crust—mantle evolution. *Lithos* 189, 2—15. doi: 10.1016/j.lithos.2013.08.018.
- Harrison T. M., Schmitt A. K., McCulloch M. T., Lovera O. M., 2008. Early (>4,5 Ga) Formation of Terrestrial Crust: Lu-Hf, 18O/16O, and Ti Thermometry Results for Hadean Zircons. *Earth Planet. Sci. Lett.* 268(3-4), 476—486. doi: 10.1016/j.epsl.2008.02.011.
- Herzberg C., Asimow P. D., Arndt N., Niu Y., Leshner C. M., Fitton J. G., Cheadle M. J., Saunders A. D., 2007. Temperatures in ambient mantle and plumes: constraints from basalts, picrites and komatiites. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 8(2), 1—34. doi:10.1029/2006GC001390.
- Herzberg C., Rudnick R., 2012. Formation of cratonic lithosphere: An integrated thermal and petrological model. *Lithos* 149, 4—15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.01.010>.
- Hiess J., Bennett V. C., Nutman A. P., Williams I. S., 2009. In situ U-Pb, O and Hf isotopic compositions of zircon and olivine from Eoarchean rocks, West Greenland: New insights to making old crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 4489—4516. doi:10.1016/j.gca.2009.04.019.
- Hinrichs K. U., 2002. Microbial fixation of methane carbon at 2.7 Ga: Was an anaerobic mechanism possible? *Geochem. Geophys. Geosyst.* 3(7), 1—10. doi: 10.1029/2001GC000286.
- Hofmann H. J., Grey K., Hickman A. H., Thorpe R. I., 1999. Origin of 3,45 Ga coniform stromatolites in Warrawoona Group, Western Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.* 111, 1256—1262. doi: 10.1130/0016-7606(1999)111<1256:OOGCSI>2.3.CO;2.
- Holden P., Lank P., Ireland T. R., Harrison T. M., Foster J. J., Bruce Z., 2009. Mass-spectrometric mining of Hadean zircons by automated SHRIMP multi-collector and single-collector U/Pb zircon age dating: The first 100,000 grains. *Int. J. Mass Spectrom.* 206, 53—63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijms.2009.06.007>.
- Holland H. D., 2002. Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, 3811—3826.
- Ionov D. A., Carlson R. W., Doucet L. S., Golovin A. V., Oleinikov O. B., 2015. The age and history of the lithospheric mantle of the Siberian craton: Re-Os and PGE study of peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 428, 108—119. doi: 10.1016/j.epsl.2015.07.007.
- Isley A. E., Abbott D. H., 2002. Implication for the temporal distribution of high-Mg magmas for mantle plume volcanism through time. *J. Geol.* 110, 141—158.
- Klein C., 2005. Some Precambrian banded iron formation (BIFs) from around the world: their age, geological setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin. *American Mineralogist* 90, 1473—1499. doi: 10.2138/am.2005.1871.
- Koreshkova M. Yu., Downes H., Nikitina L. P., Vladynkin N. V., Larionov A. N., Sergeev S. A., 2009. Trace element and age characteristics of zircons in granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Siberia. *Precambrian Res.* 168, 197—212. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.09.007>.
- Liu J., Riches A. J. V., Pearson G., Luo Y., Kienlen B., Kjarsgaard B. A., Stachel Th., Armstrong J. P., 2016. Age and evolution of the deep Continental root beneath the central Rae craton, northern Canada. *Precambrian Res.* 272, 168—184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2015.11.001>

- Liu D. Y., Nutman A. P., Compston W., Wu J. S., Shen Q. H., 1992. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese Part of the Sino-Korean craton. *Geology* 20, 339—342. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0339:ROMCIT>2.3.CO;2
- Lobach-Zhuchenko S. B., Balagansky V. V., Baltybaev Sh. K., Bibikova E. V., Chekulaev V. P., Yurchenko A. V., Arestova N. A., Artemenko G. V., Egorova Yu. S., Bogomolov E. S., Sergeev S. A., Skublov S. G., Presnyakov S. L., 2014. The Orekhov-Pavlograd zone, Ukrainian Shield: Milestones of its evolutionary history and constraints for tectonic models. *Precambrian Res.* 252, 71—87. doi: 10.1016/j.precamres.2014.06.027.
- Maas R., Kinny P. D., Williams I. S., Froude D. O., Compston W., 1992. The Earth's oldest known crust — a geochronological and geochemical study of 3900—4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 1281—1300. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90062-N](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(92)90062-N).
- Nebel O., Rapp R. P., Yaxley G. M., 2014. The role of detrital zircons in Hadean crustal research. *Lithos* 190-191, 313—327. doi: 10.1016/j.lithos.2013.12.010.
- Nutman A. P., Friend C., Bennett V. C., 2001. Review of the oldest (4400—3600 Ma) geological and mineralogical record: Glimpses of the beginning. *Episodes* 24(2), 93—101.
- O'Neil J., Carlson R., Paquette J., Francis D., 2012. Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precambrian Res.* 220—221, 23—44. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.07.009>.
- O'Reilly S. Y., Griffin W. L., 2010. The continental lithosphere-asthenosphere boundary: Can we sample it? *Lithos* 120, 1—13. doi:10.1016/j.lithos.2010.03.016.
- Peterson T. D., Pehrsson S., Skulski T., Sandeman H., 2010. Compilation of Sm-Nd Isotope Analyses of Igneous Suites, Western Churchill Province. Geological Survey of Canada, Open File 6439. doi: 10.4095/285360.
- Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., Mazukabzov A., Sklyarov E., Todt W., 2005. Multistage magmatic and metamorphic evolution in the Southern Siberian Craton: Archean and Paleoproterozoic zircon ages revealed by SHRIMP and TIMS. *Precambrian Res.* 136, 353—368. doi: 10.1016/j.precamres.2004.12.003.
- Presnal D. C., Gudfinnsson G. H., Walter M. G., 2002. Generation of mid-ocean ridge basalts at pressures from 1 to 7 GPa. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, 2073—2090. doi:10.1016/S0016-7037(02)00890-6.
- Song B., Nutman A. P., Liu D., Wu J., 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res.* 78, 79—94. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00070-4).
- Valley J. W., Peck W. H., King E. M., Wilde S. A., 2002. A cool early Earth. *Geology* 30, 351—354. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0351:ACEE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0351:ACEE>2.0.CO;2).
- Walter M. J., 2005. Melt Extraction and Compositional Variability in Mantle Lithosphere. In: *The Mantle and Core*. Ed. R. W. Carlson. Oxford: Elsevier Ltd. P. 363—394.
- Wyllie P. J., 1977. Effects of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> on magma generation in the crust and mantle. *J. Geol. Soc.* 134, 215—234. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.134.2.0215>.
- Wyllie P. J., Ryabchikov I. D., 2000. Volatile components, magmas, and critical fluids in upwelling mantle. *J. Petrol.* 41(7), 1195—1205. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.7.1195>.

## Пространственно-временные изменения геомагнитного поля и сейсмичность

© М. И. Орлюк, А. В. Марченко, А. А. Роменец, 2017

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина  
Поступила 12 октября 2017 г.

Виконано аналіз просторово-часових змін магнітного поля Землі та її сейсмічності за період 1950—2015 рр. Для аналізу використано 12-ту модель міжнародного геомагнітного аналітичного поля Землі  $B_{IGRF-12}$  (2015—2020). Ця модель дає змогу вивчати характерні особливості магнітних аномалій з розмірами в перші тисячі кілометрів. Для визначення часових змін геомагнітного поля  $dB/dt$  було створено числові масиви даних  $B_{IGRF}$  для періоду 1950—2015 рр. за сіткою  $1^\circ \times 1^\circ$  та інтервалом 5 років. Часові зміни геомагнітного поля за період 1950—2015 рр. було розділено його усередненням на умовно довгохвильову «ядрову» та короткохвильову «мантіїно-літосферну» складові. Для «ядрової» компоненти поля виділено три фокуси з від'ємним і два з додатним градієнтами геомагнітного поля. Зміна і градієнт поля в цих фокусах за 65 років змінюються в межах від  $-6600$  до  $2000$  нТл (від  $-100$  до  $30$  нТл/рік) і характеризуються істотним західним дрейфом. Для «мантіїно-літосферної» компоненти геомагнітного поля виділено 12 фокусів з позитивним і 10 з негативним градієнтом поля. При цьому за 65 років більшість фокусів не змінили свого місця розташування, а зміна поля і його градієнт становлять  $175$ — $490$  нТл ( $(2,5$ — $7,5)$  нТл/рік) для додатних і  $-(220$ — $535)$  нТл ( $-(3,4$ — $8,2)$  нТл/рік) для від'ємних величин приростів поля. Для планети в цілому виявлено меншу сейсмічність південно-західної області, яка характеризується істотним зменшенням «ядрової» частини поля порівняно з північно-східною гемісферою. Виявлено взаємозв'язок між ділянками з підвищеною сейсмічною активністю, фокусами мантіїно-літосферної складової геомагнітного поля та областями її змін, які у тектонічному відношенні відповідають зонам зчленування літосферних плит «субдукційного», «колізійного» і «серединноокеансько-рифтового» типів. На підставі виявлених закономірностей запропоновано два механізми такого зв'язку: а) «температурно-магнітний», зумовлений зануренням магнітних блоків океанічної кори в зоні субдукції, а також серпентинізацією ультраосновних порід верхньої мантії; б) «флюїдогазово-магнітний», який ґрунтується на утворенні та трансформації залістих мінералів під впливом мантіїних газів і флюїдів. Магнітні блоки літосфери Землі є міцнішими порівняно з немагнітними. Таким чином, у межах блоків, а також на їхніх краях можливе накопичення більших напружень і, відповідно, передумов формування осередків землетрусів.

**Ключові слова:** геомагнітне поле, сейсмічність, плити літосфери, намагніченість, глибинні флюїди.

**Введение.** Поиску и анализу возможной связи между сейсмическими событиями и магнитными возмущениями внешнего и внутреннего происхождения посвящено много работ [Левшенко, 1995; Кузнецова та ін., 2005; Гохберг, Шалимов, 2008; Сергеева и др., 2009; Богданов и др., 2009; Шуман, 2010, 2012; Собисевич и др., 2010, 2012,

2013а,б; Гульельми, Зотов, 2012; Щербина, 2013; Mavrodiev et al., 2015; Ягодин, 2015]. Намного меньше публикаций [Кочергин и др., 1980; Орлюк, Пашкевич, 1993; Пашкевич и др., 1993; Собисевич и др., 2014; Орлюк и др., 2016б], в которых проанализированы длинноволновые аномалии геомагнитного поля и магнитная неодно-

родность областей коры и литосферы, где происходят сейсмические события. Поскольку зоны повышенной сейсмичности можно считать своеобразными «маркерами» реализации на поверхности планеты глубинных геодинамических процессов, то будем сопоставлять их с современными изменениями модуля индукции главного магнитного поля Земли (ГМПЗ)  $B_{IGRF}$ . ГМПЗ зависит от источников в жидком ядре и мантии, а его изменения — от динамических процессов в этих слоях Земли. Таким образом, и сейсмичность, и изменение геомагнитного поля обусловлены одними и теми же современными геодинамическими процессами в ядре и мантии Земли, что позволяет проводить их совместный анализ. В историческом аспекте данному вопросу были посвящены исследования, проводимые еще в первой половине XX в. В обобщающей работе [Оль, 1949] обращено внимание на приуроченность фокусов векового хода вертикальной компоненты геомагнитного поля для временного интервала 1912,5—1942,5 гг. к областям повышенной сейсмичности Земли. Были проанализированы две гипотезы природы вековых изменений геомагнитного поля: 1) вертикальные перемещения намагниченных пород и их подкорковые течения; 2) физические процессы на границе жидкого ядра. Фактические данные на тот момент позволили А. И. Олю отдать предпочтение первой гипотезе. Главным критерием при этом была пространственная совмещенность источников данных явлений. С тех пор общепринято [Finlay et al., 2016], что аномалии векового хода имеют источники в жидком ядре Земли и, по-видимому, сейсмичность может быть связана с ними только опосредованно. Представляется, что для такого рода сопоставлений необходимым является выделение части геомагнитного поля, предположительно связанной с верхней мантией и литосферой. Разделение поля на главное магнитное (поле ядра) и аномальное магнитное (поле литосферы) производится путем его представления сферическим гармоническим рядом разной длины:  $n=1 \div 13$  — поле ядра,  $n$  от 14 до

16—720 и т. д. — поле литосферы [Purucker, Whaler, 2007; Finlay et al., 2016]. Однако, как показано в ряде публикаций, существуют магнитные модели крупных тектонических структур (древние платформы, континенты и т. д.), аномалии от которых с длинами волн 3000—5000 км, в соответствии со сферическим гармоническим анализом, будут относиться к полю ядра [Fedorova, Shapiro, 1998; Thébaud et al., 2010]. В дальнейшем анализе использовалась 12-я модель ГМПЗ —  $B_{IGRF-12}$  с длиной сферического ряда 13-го порядка, что обуславливает наличие аномалий с длинами волн до 3000 км [Mandea, Korte, 2011; Thébaud et al., 2015]. В соответствии с работами [Симоненко, 1976; Петромагнитная..., 1994; Орлюк, Пашкевич, 1995; Pashkevich, Orlyuk, 1997], магнитные аномалии с длиной волны 2000—4000 км могут быть вызваны суперпозиционным эффектом литосферных источников. Следовательно, в ГМПЗ может присутствовать эффект литосферных магнитных источников. Для проверки этого предположения выполнено разделение ГМПЗ на две разноволновые составляющие: «ядровую» и «мантийно-литосферную», и исследован их вековой ход для временного интервала 1950—2015 гг.

**Вековые изменения геомагнитного поля.** ГМПЗ состоит из дипольной и недипольной частей и принимается за нормальное поле Земли при выделении аномальной компоненты, связанной с литосферой. Значение модуля индукции главного поля на поверхности Земли характеризуется существенной пространственной неоднородностью от 60000—65000 нТл на магнитных полюсах до 20000—35000 нТл на магнитном экваторе (рис. 1) [Thébaud et al., 2010]. Согласно экспериментальным данным магнитное поле Земли на протяжении последних 300 лет постоянно ослабляется и за период с 1950 по 2010 г. среднее значение модуля индукции на поверхности планеты уменьшилось на 1300 нТл [Орлюк, Роменец, 2011].

Для определения временного градиента модуля индукции ГМПЗ были созданы числовые массивы данных  $B_{IGRF}$  для периода

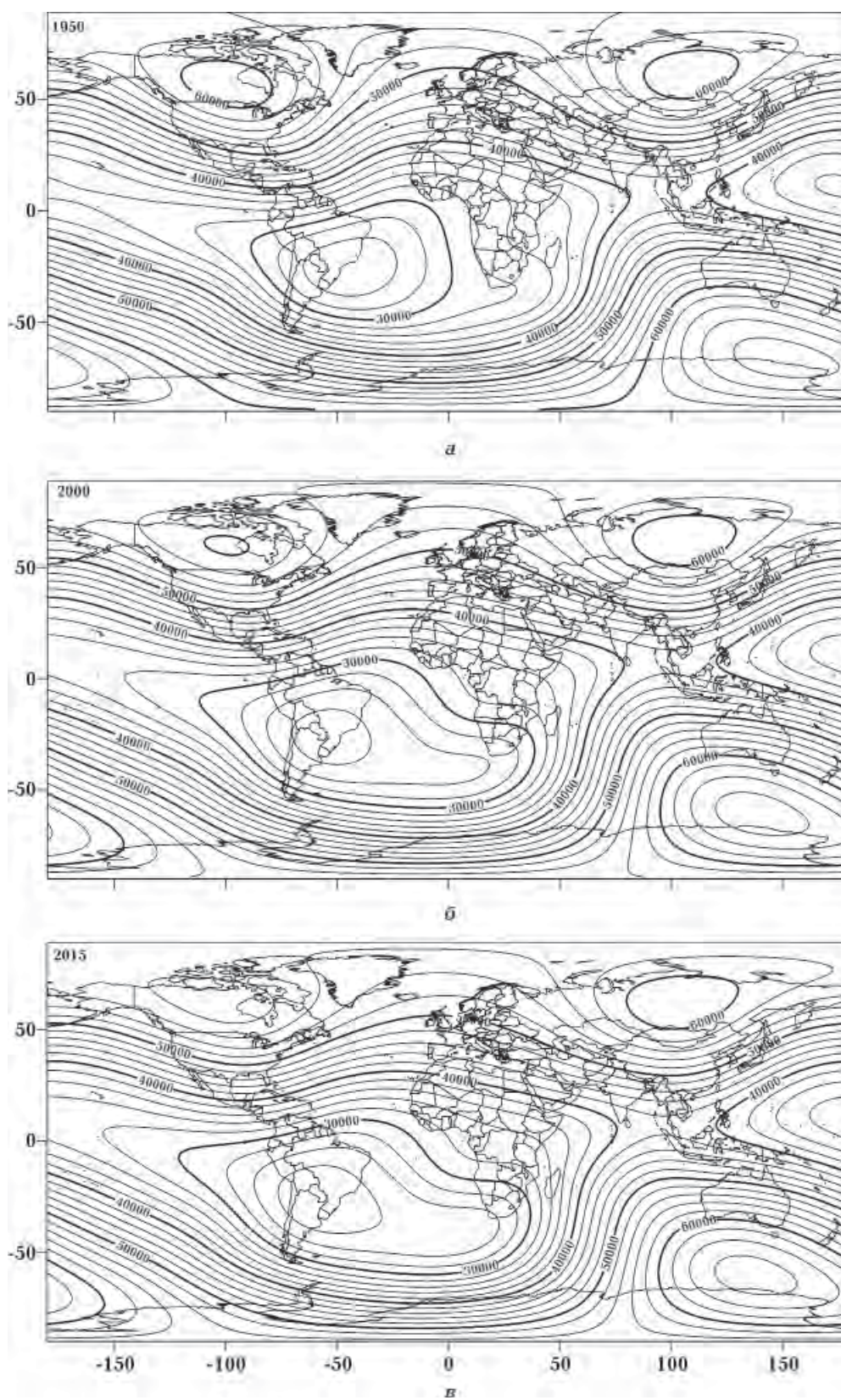


Рис. 1. Модуль индукции главного магнитного поля Земли  $V_{IGRF}$  на эпохи 1950 (а), 2000 (б) и 2015 (в) годов (изолинии в нанотесла).



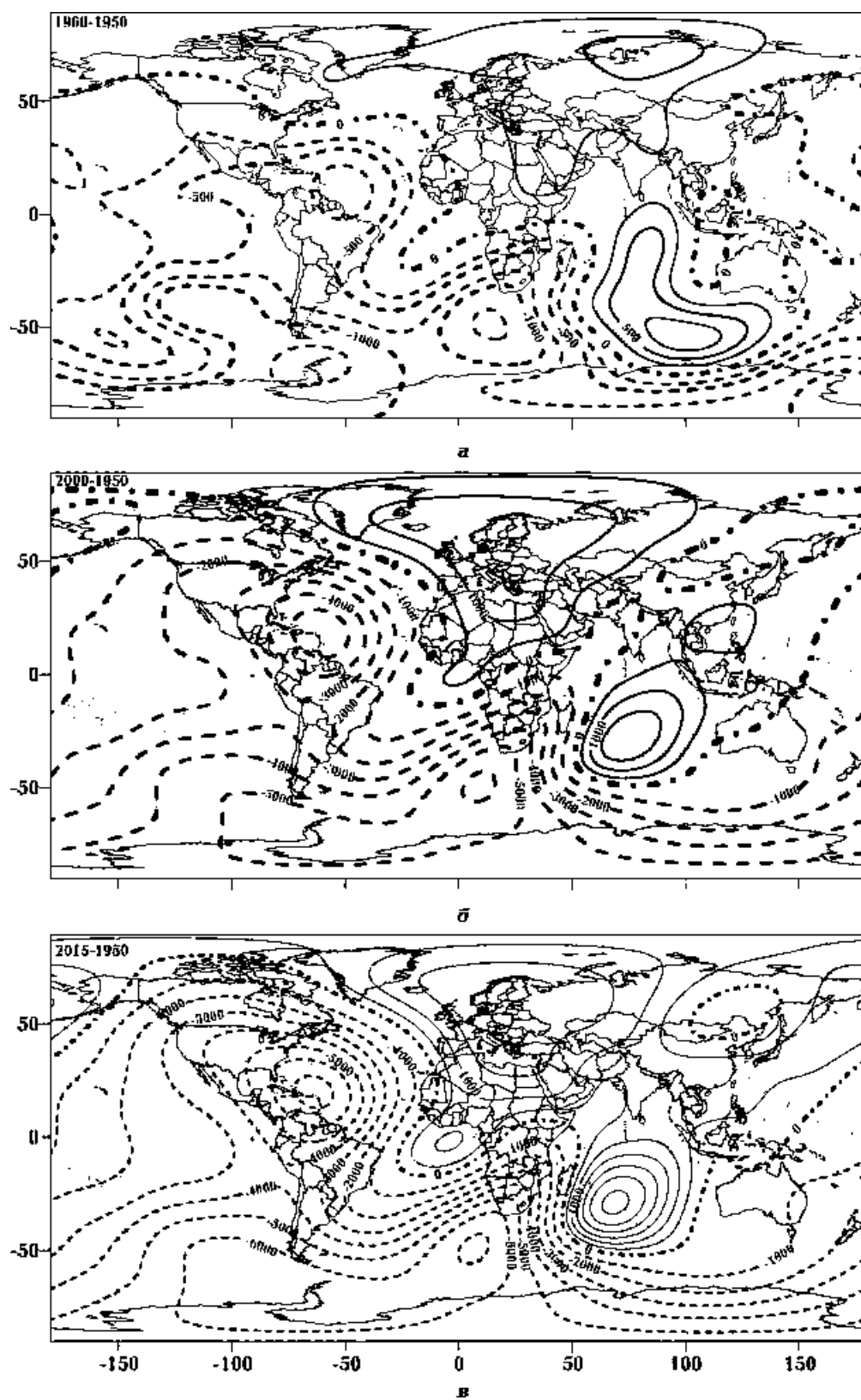


Рис. 2. Временной градиент главного магнитного поля Земли  $dV_{IGRF}/dt$  для временных интервалов 1960—1950 (а), 2000—1950 (б), 2015—1950 (в) (изолинии в нанотесла).

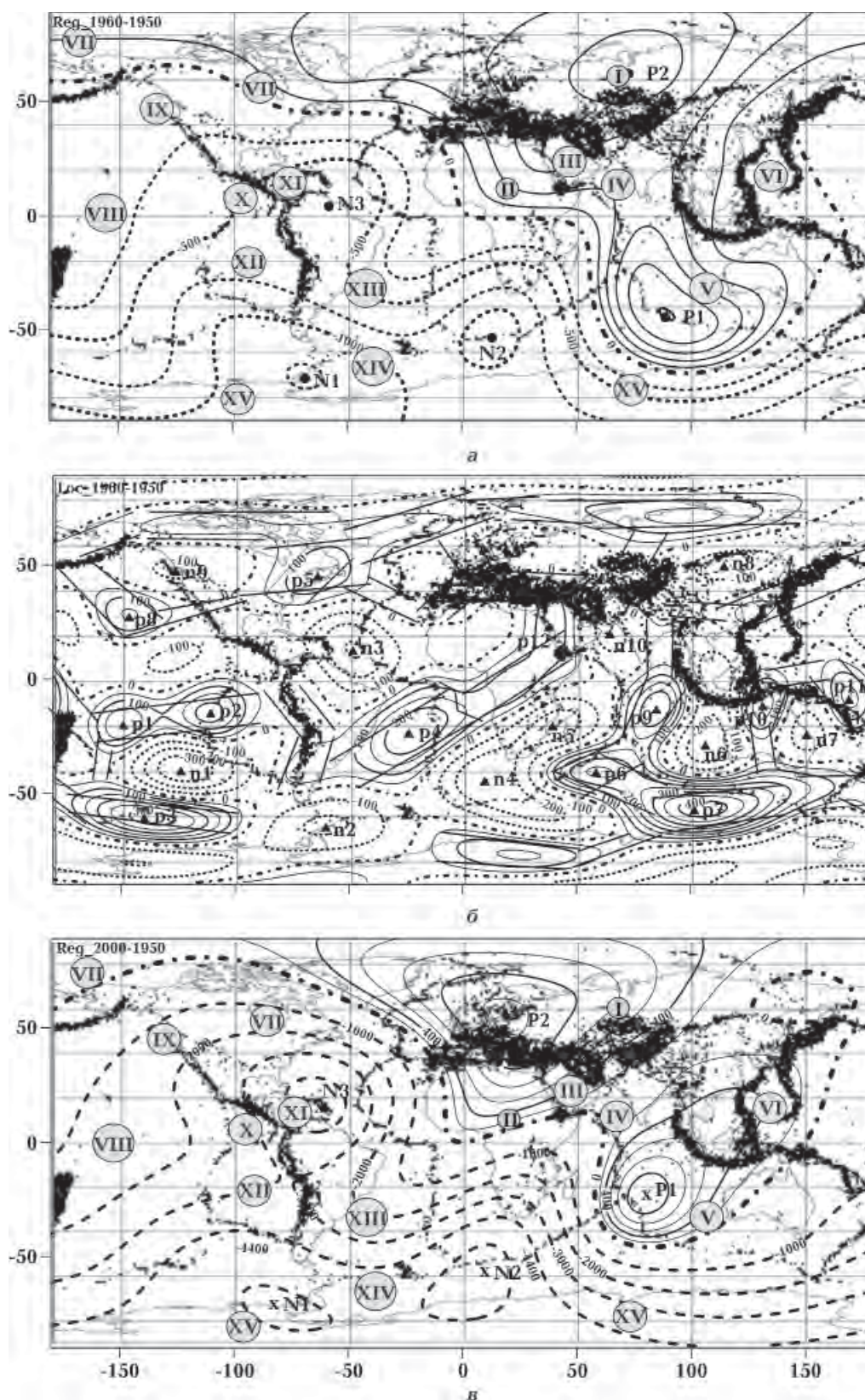
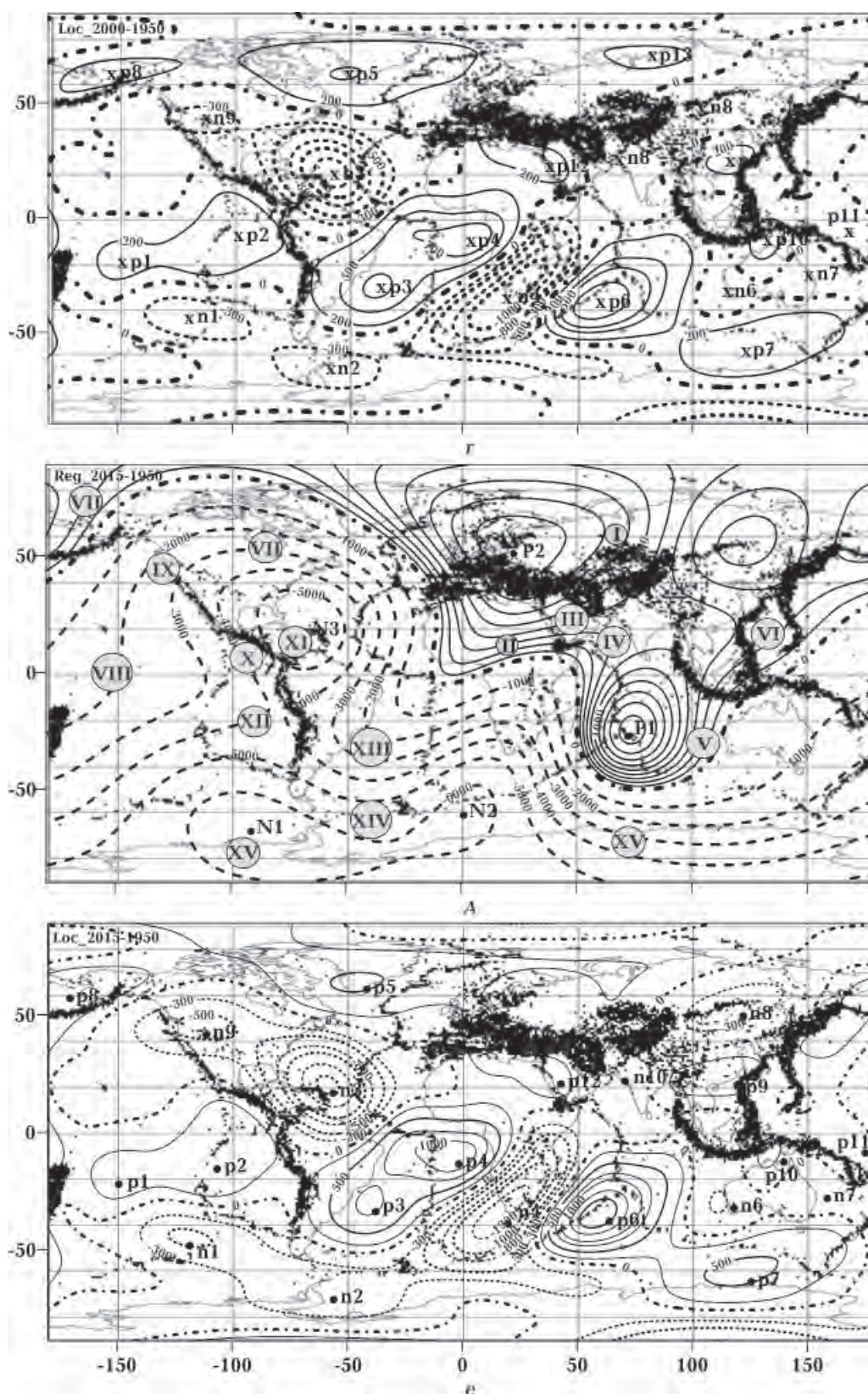


Рис. 3. Сопоставление сейсмичности (черные кружки) с временным градиентом «ядровой»  $dB_{IGRF}/dt$  и 1950—2015 гг. (д, е). Черными прямыми линиями обозначены полосы положительного временного градиента плиты: I — Евразийская, II — Африканская, III — Аравийская, IV — Индостанская, V — Австралийская, XI — Карибская, XII — Наска, XIII — Южно-Американская, XIV — Скоша, XV — Антарктическая.



«мантийно-литосферной»  $dB_{M-LIGRF}/dt$  составляющих за период 1950—1960 гг. (а, б) 1950—2000 гг. (в, г) «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля. Римские цифры в кружках — литосферные VI — Филиппинская, VII — Северо-Американская, VIII — Тихоокеанская, IX — Хуана де Фука, X — Кокос,

1950—2015 гг. по сети  $1^\circ \times 1^\circ$  и интервалом в 5 лет. За начало расчета принят 1950 г., в дальнейшем градиент поля за 5 лет определяется как разница между его значениями в 1955 и 1950 г. ( $dB_{IGRF(1955-1950)}/dt = B_{IGRF(1955)} - B_{IGRF(1950)}$ ), за 10 лет — как разница между 1960 и 1950 г. ( $dB_{IGRF(1960-1950)}/dt = B_{IGRF(1960)} - B_{IGRF(1950)}$ ) и т. д. до 2015 г. Такой подход позволяет анализировать как градиент поля за каждые 5 лет, так и суммарные его величины для более длительных интервалов. На рис. 2, а видно, что градиент поля  $dB_{IGRF(1960-1950)}/dt$  за 10 лет изменяется в пределах от  $-1500$  до  $1000$  нТл (от  $-150$  до  $100$  нТл/год).

Как показано в работах [Орлюк, Роменец, 2011; Орлюк и др., 2016а], для временного интервала с 1950 по 2000 г. на фоне общего уменьшения магнитного поля планеты выделяются области с экстремальными величинами его изменения: максимумы уменьшения поля от  $-5500$  до  $-6500$  нТл (от  $-110$  до  $-130$  нТл/год) располагаются вблизи Атлантического побережья Центральной Америки ( $18^\circ$  с.ш.;  $-65^\circ$  з.д.), а также между Африкой и Антарктидой ( $-50^\circ$  ю.ш.,  $10^\circ$  в.д.) (рис. 2, б). Максимумы увеличения поля ( $2000$  нТл) ( $40$  нТл/год) характерны для Европы ( $60^\circ$  с.ш.,  $30^\circ$  в.д.) и Индийского океана ( $30^\circ$  ю.ш.,  $80^\circ$  з.д.).

В общих чертах такая же закономерность сохраняется и в дальнейшем (рис. 2, в).

Разделение временного градиента магнитного поля  $dB_{IGRF}/dt$  на разноволновые составляющие проводилось путем осреднения его величин (рассчитанных по сети  $1^\circ \times 1^\circ$ ) с ячейкой  $40^\circ \times 40^\circ$ . Размер окна осреднения выбирался из тех соображений, чтобы выделить аномалии с длинами волн в первые тысячи километров, источники которых могут иметь «мантийно-литосферную» природу. «Мантийно-литосферная» компонента градиента вычислялась как разность между полными и осредненными его величинами  $dB_{M-L}/dt = dB_{IGRF}/dt - dB_{IGRF40 \times 40}/dt$  (рис. 3). В соответствии с расчетами «ядровая» компонента геомагнитного поля для временного интервала 1960—1950 гг. имеет градиент  $dB_{Я,IGRF}/dt$  в пределах от  $-1300$  до  $700$  нТл (рис. 3, а),

а «мантийно-литосферная»  $dB_{M-L,IGRF}/dt$  — от  $-400$  до  $500$  нТл (рис. 3, б). Как видно из рис. 3, в, г, для временного интервала 1950—2000 гг. основные изменения в поле происходят также за счет длинноволновой, т. е. «ядровой» компоненты. Величина динамики этой части поля (от  $-6000$  до  $1500$  нТл) и ее характер находятся в соответствии с величиной суммарных значений  $dB_{IGRF}/dt$  [Орлюк, Роменец, 2005] (см. рис. 3, в). Для периода 1950—2015 гг. прирост «ядровой» части поля составляет от  $-6600$  до  $2000$  нТл (см. рис. 3, д). При этом Земля может быть разделена на две области: северо-восточную с положительным изменением  $dB_{IGRF}/dt$  до  $+30$  нТл/год и юго-западную с отрицательным до  $-120$  нТл/год. Граница между ними примерно может быть проведена по северо-восточному краю Северо-Американского континента — Азорским островам — юг о-ва Мадагаскар — Большой Австралийский залив — Соломоновы и Маршалловы о-ва Тихого океана — север Скалистых гор. Северо-восточная область положительного прироста магнитного поля имеет условный центр в районе Тянь-Шаня ( $75-80^\circ$  в.д.,  $40-45^\circ$  с.ш.), а юго-западная — на юго-востоке Тихого океана ( $100-105^\circ$  з.д.,  $30-35^\circ$  ю.ш.) (рис. 3, а). В целом северо-восточная область положительного градиента поля охватывает области континентальной коры Евразии, большей части Африки, частично Австралии, а также кору субокеанического переходного типа. Коротковолновая (мантийно-литосферная) компонента градиента поля для периода 1950—2000 гг. имеет более сложный характер с большим количеством максимумов и минимумов с интенсивностью от  $-1400$  до  $1300$  нТл (от  $-28$  до  $+26$  нТл/год) (см. рис. 3, г), при этом подавляющее их большинство не превышает первые сотни нанотесла (от  $-6$  до  $+6$  нТл/год). Проанализируем кратко величины изменения прироста геомагнитного поля с 1950 по 2015 г. на основании анализа изменений поля «ядровой» и «мантийно-литосферной» компоненты.

В период 1960—1950 гг. для «ядровой» компоненты поля условно можно выде-

лить три отрицательных фокуса (в районе Антарктического п-ова, между Африканским континентом и Антарктидой и на севере Южноамериканского континента) и два положительных (на юге Индийского океана и в Западной Сибири) фокуса (см. рис. 3, а, б). Как видно из табл. 1, в которой приведены координаты фокусов и градиент поля за соответствующие временные интервалы, они имеют существенные пространственно-временные изменения. В частности, за 65 лет интенсивность фокуса N1 изменилась на  $-6400$  нТл, а по долготе он переместился более чем на  $21^\circ$  с незначительным перемещением по широте (около  $3^\circ$ ), что свидетельствует о его существенном западном дрейфе. Сильный западный дрейф характерен и для других фокусов градиента магнитного поля, но при этом интенсивность положительных фокусов меньше в три раза относительно таковой отрицательных фокусов.

**Таблица 1. Изменение положения и интенсивности фокусов отрицательного (N) и положительного (P) градиента поля «ядровой» компоненты геомагнитного поля с 1950 по 2015 г.**

Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл
1960—1950			
N1	-68,077	-70,679	-1210
N2	13,853	-53,102	-1075
N3	-57,962	5,155	-720
P1	88,683	-44,062	500
P2	72,11	62,407	465
2000—1950			
N1	-83,599	-70,907	-5060
N2	8,502	-56,892	-5350
N3	-63,777	16,758	-4415
P1	80,18	-23,255	1135
P2	18,913	55,231	1240
2015—1950			
N1	-89,695	-66,972	-6400
N2	2,518	-59,68	-6285
N3	-67,348	19,83	-5910
P1	74,029	-25,571	1895
P2	24,159	53,704	1730

Для «мантийно-литосферной» компоненты магнитного поля Земли для периода 1950—1960 гг. можно наметить 12 положительных и 10 отрицательных фокусов градиента поля (см. рис. 3, б и табл. 2). Градиент магнитного поля, как правило, составляет первые десятки нанотесла в год. В частности, с 1950 по 1960 гг. градиент поля находится в пределах  $135—430$  нТл для положительных фокусов и  $-(120—380)$  нТл для отрицательных. Со временем наблюдается закономерное увеличение или уменьшение величины поля. При этом отдельные фокусы (P3, P4, P6, N3, N4) с максимальными изменениями достигают за 65 лет значений  $\pm(1100—1600)$  нТл. Эти же пункты характеризуются максималь-

**Таблица 2. Изменение положения и интенсивности фокусов отрицательного (N) и положительного (P) градиента поля «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля с 1950 по 2015 г.**

Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл
1960—1950			
N1	-122,972	-39,52	-380
N2	-59,426	-64,585	-220
N3	-47,776	13,081	-310
N4	10,473	-44,109	-300
N5	40,481	-20,103	-265
N6	106,851	-28,223	-300
N7	150,441	-24,596	-155
N8	114,714	50,268	-140
N9	-124,476	46,972	-120
N10	65,275	20,134	-140
P1	-149,449	-19,397	200
P2	-109,91	-14,455	225
P3	-138,505	-60,349	320
P4	-22,711	-23,633	250
P5	-62,251	45,56	140
P6	58,694	-40,734	260
P7	102,262	-56,465	430
P8	-145,471	27,839	160
P9	85,296	-12,695	250
P10	131,85	-11,491	180
P11	169,576	-8,281	165
P12	38,419	22,443	135

Продолжение табл. 2

Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл	Фокус	Долгота	Широта	dB, нТл
2000—1950				2015—1950			
N1	-120,543	-43,737	-485	N1	-118,706	-44,991	-535
N2	-59,373	-65,626	-380	N2	-58,073	-67,958	-490
N3	-56,763	18,587	-1310	N3	-58,066	19,624	-1550
N4	17,834	-35,576	-1165	N4	15,728	-35,498	-1465
N5	—	—	—	N5	—	—	—
N6	114,064	-32,608	-175	N6	111,639	-29,158	-325
N7	149,87	-25,188	-185	N7	150,963	-24,731	-220
N8	103,247	47,524	-315	N8	114,872	52,494	-430
N9	-112,71	42,702	-355	N9	-111,86	44,022	-560
N10	66,761	25,228	-295	N10	65,159	24,465	-260
P1	-149,448	-19,456	285	P1	-148,41	-19,268	315
P2	-98,966	-8,454	395	P2	-106,763	-12,531	490
P3	-36,569	-30,619	740	P3	-39,698	-30,598	840
P4	2,327	-10,469	835	P4	-4,789	-10,693	1140
P5	-50,422	62,364	510	P5	-43,689	63,414	530
P6	59,051	-37,067	1245	P6	58,906	-34,885	1665
P7	122,269	-58,577	440	P7	118,621	-60,609	575
P8	-154,111	62,363	280	P8	-169,342	59,443	450
P9	115,556	24,523	260	P9	113,109	22,685	335
P10	131,967	-9,978	290	P10	132,734	-9,563	245
P11	167,027	-6,268	190	P11	167,237	-6,042	175
P12	36,483	22,297	275	P12	38,379	23,18	325

ными изменениями пространственного положения (см. табл. 2). По-видимому, пространственно-временные изменения этих фокусов приближают их к фокусам «ядровой» компоненты магнитного поля. Принципиальное отличие в том, что в координатах изменения этих пунктов нет западного дрейфа.

С точки зрения авторов большой интерес вызывают положительные и отрицательные фокусы, местоположение которых не изменяется во времени. Как правило, они характеризуются незначительным градиентом магнитного поля. К таковым относятся фокусы P1, P2, P10, P11, P12 и др., которые находятся на одном и том же месте, в основном в пределах или вблизи границ литосферных плит.

Стоит отметить, что большинство положительных и отрицательных фокусов

находится в пределах условных полос, простирающихся которых не изменяются в исследуемом временном интервале. Также часто трудно выделить отдельный фокус из-за вытянутости аномалий градиента магнитного поля и из-за того, что они могут мигрировать вдоль выделенных полос.

Как уже было отмечено, в «стабильных» фокусах градиент поля составляет первые сотни нанотесла за 65 лет, от 175 нТл для фокуса P11 до 490 нТл для P2 (т. е. в пределах 2,5—7,5 нТл/год). Такая же картина характерна и для фокусов с отрицательным градиентом. В частности, фокусы N1, N2, N7, N10 практически не изменяют своего местоположения, а прирост поля за 65 лет находится в пределах от 220 нТл (N7) до -535 нТл (N1) (-3,4—8,2) нТл/год). Важно, что фокусы «мантийно-литосферной» составляющей стоят на месте либо изменяют

свое местоположение в пределах определенных полос, не испытывая при этом хорошо выраженного западного дрейфа. По-видимому, в связи с выполненным анализом в очередной раз можно поставить вопрос о неоднозначности разделения геомагнитного поля на нормальную и аномальную компоненты и неоднозначной интерпретации природы источников материковых аномалий. Материковые аномалии и частая приуроченность к ним фокусов векового хода могут быть объяснены как намагниченностью земной коры, так и источниками в самых верхних слоях внешнего ядра, которые жестко связаны электромагнитным взаимодействием с твердой мантией [Андреев, 1960; Русаков, 1969; Петрова, 1976; Почтарев, 1983; Колесова, 1985]. Вероятно, включение «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля в аномалии модуля индукции  $\Delta B$  позволит провести их интерпретацию с наличием источников не только в земной коре, но и в верхней мантии, что существенно повысит возможности геомагнитного метода относительно исследования состава и процессов в этих слоях Земли.

**Современная сейсмичность Земли**, которая оценивается общим количеством землетрясений за исследуемый временной интервал (Catalog Global CMT, <http://www.globalcmt.org>), сконцентрирована в двух мегапоясах: Тихоокеанском (сейсмически активные области Аляски, Алеутских островов, Камчатки, Курильских островов, Японии, Филиппин, Новой Зеландии, Южной, Центральной и Северной Америки) и Средиземноморско-Трансазиатском (тянется в субширотно-юго-восточном направлении по Средиземному морю и прилегающим к нему южноевропейским горным массивам, а также горам Северной Африки и Малой Азии, хребтам Кавказа и Ирана, через Среднюю Азию, Гиндукуш к Куэнь-Луню и Гималаям до Индонезии). Область Океании можно интерпретировать в качестве условного пересечения этих двух сейсмических поясов.

**Вековые изменения магнитного поля и сейсмичности Земли.** Прежде всего отме-

тим широтно-диагональную систему простирания главных структурных элементов зон сейсмичности и изменений геомагнитного поля, а также меньшую насыщенность участками с повышенной сейсмичностью юго-западной области (рис. 3), которая характеризуется уменьшением геомагнитного поля по сравнению с северо-восточной областью Земли. На северо-восточную область положительных величин градиента «ядровой» компоненты магнитного поля  $dB_{\text{яIGRF}}/dt$  приходятся зоны сейсмичности Средиземноморско-Трансазиатского пояса и западно-юго-западная часть Тихоокеанского пояса, а также срединных хребтов Индийского и Тихого (северо-восточного простирания) океанов (см. рис. 3, а, б). Интересно, что усложнение строения и нарушения (утолщение, смещение, изменение направления простирания и т. д.) зон повышенной сейсмичности доминирующего северо-западного простирания приурочены к зонам с отрицательным или положительным приростом  $dB_{\text{IGRF}}/dt$  северо-восточного простирания. В частности, в зоне Южноафриканско-Колымской полосы северо-восточного простирания относительного уменьшения геомагнитного поля наблюдается смещение сейсмических областей Срединного хребта Индийского океана и Средиземноморско-Трансазиатского поля на северо-восток и своего рода раздробление сейсмоактивных зон ряда участков (см. рис. 3). Менее наглядно такая же закономерность наблюдается и на западе Северной Америки. Отмеченная ранее закономерность принадлежности большего количества полос с повышенной сейсмичностью к северо-восточной области, которая характеризуется положительным градиентом  $dB_{\text{IGRF}}/dt$ , находит подтверждение и на «мантийно-литосферном» уровне. Как видно на рис. 3, б, г, е, за последние 65 лет подавляющее большинство сейсмических участков и полос приходится на области существенного положительного градиента геомагнитного поля или же зон его своеобразных «пережимов», а также повышенных горизонтальных градиентов.

Более того, чрезвычайно интересным является факт принадлежности областей с положительным градиентом геомагнитного поля для разных типов сочленения плит — «субдукционного», характерного для сочленения литосферы континентального и океанского типов, океанского («срединно-океанических хребтов») и коллизионного («континентального») типов. В частности, повышенными значениями прироста геомагнитного поля северо-восточного простирания характеризуется область тройного сочленения срединно-океанических хребтов в Индийском океане, которые разделяют Африканскую, Австралийскую и Антарктическую плиты, а также субдукционные зоны между Филиппинской и Евразийской, и между Тихоокеанской и Северо-Американской плитами. Создается впечатление, что и зоны срединно-океанических хребтов, и зоны субдукции контролируются системой глубинных мантийных линейментов. Интерес вызывают большие величины градиента «мантийно-литосферной» компоненты для срединно-океанических хребтов по сравнению с таковыми для двух других типов сочленения литосферных плит включительно с зонами субдукции.

Следующим важным моментом является тот факт, что западному дрейфу подвержена только «ядровая» часть магнитного поля Земли, а фокусы «мантийно-литосферной» компоненты не изменяют своего пространственного положения. В соответствии с анализом вековых изменений геомагнитного поля для периода 2015—1950 гг. фокусы «ядровой» компоненты поля имеют существенный западный дрейф (до 20° за 65 лет). Как факт следует отметить, что при общей тенденции дрейфа в западном направлении выявленные фокусы часто смещаются по областям с повышенной сейсмичностью, т. е. вдоль границ литосферных плит или коллинеарно к ним. В противоположность фокусам «ядровой» компоненты поля фокусы «мантийно-литосферной» составляющей геомагнитного поля практически остаются на месте для исследуемого временного интервала (см. рис. 2, б). Данный факт служит

очень сильным аргументом в пользу того, что в геомагнитном поле присутствуют аномалии мантийно-литосферной природы, а их приуроченность к областям сочленения литосферных плит свидетельствует об относительно небольших глубинах залегания их источников (первые сотни километров).

Выявленная на качественном уровне связь областей сейсмичности Земли с положительным градиентом геомагнитного поля для временного интервала 1950—2000 гг. [Орлюк и др., 2016а,б] подтверждается и в дальнейшем. На рис. 3 приведены области повышенной сейсмичности и градиента «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля для 1950—2015 гг., что в целом подтверждает выявленную закономерность. Естественно, что в этой закономерности есть исключение. В частности, в области Северной и Центральной Америки, а также Океании повышенная сейсмичность приурочена к областям отрицательного градиента магнитного поля или к зонам его повышенных градиентов.

Заметим, что наличие региональных магнитных аномалий с длиной волн 200—400, 500—700 и 1100—1300 км в пределах древних платформ, а также рифтов и островных дуг было отмечено давно [Кочергин и др., 1980; Колесова, 1985; Орлюк, 1991; Орлюк, Пашкевич, 1995, 2012]. Позже приуроченность длинноволновых аномалий близких классов к областям субдукции Тихоокеанского сейсмического пояса была показана в работах [Blakely et al., 2005; Purucker, Clark, 2011]. Следовательно, выявленные аномалии промежуточного класса с длинами волн в первые тысячи километров, отнесенные к зонам сочленения литосферных плит, позволяют поновому посмотреть на глубинное строение этих структур и рассмотреть возможные механизмы формирования их источников.

**Качественный анализ прогнозируемых механизмов взаимосвязи сейсмичности и магнитное поле Земли.** Выявленная зависимость между сейсмичностью Земли и вековым ходом «ядровой» и «мантийно-



литосферной» составляющих геомагнитного поля позволяют рассмотреть в первом приближении возможные механизмы их взаимосвязи. Прежде всего следует отметить достаточно хорошую пространственную совмещенность этих двух геофизических явлений, особенно для градиента «мантийно-литосферной» компоненты и сейсмичности зон сочленения литосферных плит. Это дает основание для анализа и предложения опосредованных или непосредственных механизмов такой взаимосвязи. В настоящее время опосредованная взаимосвязь сейсмичности Земли со структурой геомагнитного поля отмечена в работах [Khachikyan et al., 2012; Хачикян и др., 2013]. В этих публикациях показано, что география распределения на планете сейсмотектонических поясов связана с геометрией ее главного геомагнитного поля, а максимальная сейсмичность северного и южного ограничений литосферных плит приурочена к геомагнитным широтам с углом наклона вектора индукции  $\pm(45—60)^\circ$ . Естественно, что при этом можно говорить об опосредованной связи, обусловленной, возможно, разной прочностью пород в зависимости от направления вектора их намагниченности и соотношения с ним вектора поля напряжений. Поэтому стоит обратить внимание на связь очагов землетрясений с магнитными блоками земной коры или их границами, как показано на примере Сычуаньского землетрясения 20 апреля 2013 г. [Собисевич и др., 2014]. Объяснением этого может служить тот факт, что намагниченная порода обладает большей прочностью за счет взаимодействия магнитных минералов, и таким образом в пределах магнитных блоков возможно накопление больших напряжений по сравнению с их размагниченными частями. Максимальное накопление напряжений при этом возможно в интервале температур эффекта Гопкинсона вблизи температуры Кюри ферромагнетика, характеризующегося резким увеличением магнитной восприимчивости пород.

Более определенно можно говорить о предполагаемых механизмах взаимосвя-

зи «мантийно-литосферной» компоненты геомагнитного поля с сейсмичностью зон сочленения литосферных плит.

Рассмотрим один из них на примере субдукционных зон между Филиппинской и Евразийской, а также Тихоокеанской и Северо-Американской плитами. Эта область выделяется «мантийно-литосферной» аномалией северо-восточного простирания интенсивностью 150—220 нТл, которая возникла за 50 лет, т. е. прирост поля составляет 3,0—4,4 нТл/год. Она расположена над зоной субдукции западного и юго-западного падения, которая трассируется путем нарушения переходных зон на глубинах 410 и 660 км и характеризуется в глубинной части относительным снижением скорости продольных сейсмических волн на 0,4—0,8 км/с [Niu et al., 2005]. Такое снижение можно объяснить наличием коровых базальтов или железистых, возможно серпентинизированных, ультраосновных мантийных пород. Относительно методики интерпретации аномалий временных изменений геомагнитного поля, она рассматривалась как статическая. В дальнейшем задавалась модель источника намагниченности литосферы, рассчитанное магнитное поле которого соответствует данной аномалии. Полученные значения намагниченности нормировались на количество лет, т. е. вычислялся градиент за один год. Было рассчитано несколько эквивалентных моделей магнитных источников, расположенных на глубинах от 20 до 600 км с намагниченностью в пределах 0,3—1,0 А/м, соответствующих мантийно-литосферной аномалии. Это означает, что каждый год к источнику добавляются магнитные массы в пределах 0,006—0,02 А/м. Принципиально важной является возможность такого распределения намагниченности в литосфере и верхней мантии, которое соответствует интерпретируемой аномалии.

Не останавливаясь на модели токов, которая представляется маловероятной, так как трудно предложить механизм постоянного увеличения тока в такой относительно узкой вытянутой области верх-

ней мантии Земли на протяжении 65 лет, рассмотрим «магнитоминералогическую» природу полученной аномалии.

Для магнитоминералогического обеспечения предложенных моделей необходимо рассмотреть возможность и условия существования на глубинах магнитных минералов, которые могут создавать соответствующие магнитные аномалии. Согласно петромагнитной модели литосферы [Wasilewski, Warner, 1988; Петромагнитная..., 1994], в глубинных зонах земной коры и верхней мантии Земли есть несколько минералов, которые могут хранить магнитные свойства: магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  с температурой Кюри  $T_C=585^\circ\text{C}$  (выше которой магнетит теряет магнитные свойства), гематит ( $T_C=700^\circ\text{C}$ ) и самородное железо  $\alpha\text{-Fe}$  ( $T_C=760^\circ\text{C}$ ). Также могут присутствовать сплавы металлов, в частности железа и кобальта ( $T_C=1121^\circ\text{C}$ ), железа и меди, а также железа и никеля ( $T_C=358^\circ\text{C}$ ), которые образуются в высококовостановительной среде. Каким же образом эти магнитные минералы могут быть на глубинах, полученных по результатам интерпретации? Поскольку аномалия расположена в зоне сочленения Евразийской с одной стороны и Филиппинской и Тихоокеанской плит с другой, то можно прогнозировать заталкивание (погружение) литосферы (вместе с океанической корой) под литосферу континентального типа. Такой вариант «субдукционного» типа сочленения этих плит вероятен согласно результатам сейсмографических исследований [Niu et al., 2005]. В связи с этим можно предложить «температурно-магнитный» механизм — погружение в верхнюю мантию высокомагнитной океанической коры (4—5 А/м), намагниченность которой обусловлена прежде всего магнетитом, гематитом и, предположительно, самородным железом [Орлюк, 1999, 2000; Kletetschka et al., 2002; Ishimaru et al., 2009; Dunlop et al., 2010; Ferre et al., 2014]. Согласно работе [Петромагнитная..., 1994], океаническая кора имеет незначительную мощность (8—15 км) с увеличением от срединно-океанических хребтов к зонам субдукции. В условиях

консервации термического режима этой части субдуцированной литосферы она может оставаться магнитной на протяжении сотен тысяч лет. Кроме того, за счет дегидратации субдуцируемой океанической коры происходит серпентинизация пород верхней мантии [Hyndman, Peacock, 2003; Blakely et al., 2005] с одновременным увеличением намагниченности за счет новообразования магнетита и, предположительно, самородного железа. Следовательно, в верхней мантии в областях субдукции происходит новообразование магнитных минералов за счет серпентинизации ультраосновных пород и сохранение намагниченности океанической коры за счет консервации термического режима погружаемых пород, т.е. в течение длительного времени на больших глубинах могут находиться намагниченные блоки земной коры. Изменение магнитного поля над ними обусловлено прогревом этих блоков и достижением по его краям температур, близких к температуре Кюри магнетита, гематита и самородного железа. Ниже температуры Кюри существует температурный интервал, в пределах которого магнитная восприимчивость (намагниченность) породы возрастает в несколько, а может, и в десятки раз (так называемый эффект Хопкинсона). Именно этот процесс может вызывать увеличение геомагнитного поля перед дальнейшим его существенным уменьшением (для случая прогрева всей толщи выше температуры Кюри имеющихся магнитных минералов). Итак, перемещения блоков океанической литосферы и прогрев до и выше температуры Кюри имеющихся магнитных минералов могут вызывать быстрые изменения «мантийно-литосферной» составляющей магнитного поля Земли. Полное преобразование пород погружаемой плиты, естественно, будет отмечаться уменьшением прироста магнитного поля, которым, вероятно, можно объяснить минимум «мантийно-литосферной» компоненты, расположенный западнее рассмотренного максимума. Не исключено, что такую же природу имеют и фокусы векового хода

с отрицательным градиентом. Во всяком случае, так можно проинтерпретировать отрицательный фокус векового хода в районе северо-запада Американского континента, который, по данным [Романюк и др., 2007], может быть обусловлен полным погружением и «сломом слэба» плиты Фараллон около 42 млн лет назад.

Для срединно-океанических хребтов предлагается «флюидогазово-магнитный» механизм накопления магнитных минералов в верхней мантии и литосфере. Для обоснования данного механизма может быть использована модель глубинного флюидного режима, имеющего в своей основе первично-восстановительный характер мигрирующих из мантии флюидов и газов, главными компонентами которых являются водород, окись кислорода и метан. Взаимодействие восстановительных флюидов с различными соединениями железа и горными породами может приводить к восстановлению самородного железа  $\alpha$ -Fe [Орлюк, 1999; Лыкасов и др., 2013]. Идеализированно это можно записать следующим образом:  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ . При этом в области низких давлений и температур ( $P=1\div 10$  кбар,  $T=600$  °C) устойчив парагезис  $Fe-Fe_3O_4$ , а при высоких значениях появляется слабомагнитный вюстит — FeO [Лившиц и др., 1969]. Стоит также отметить, что предложенные трансформации соединений железа могут происходить в обратном направлении при изменении окислительно-восстановительного режима. Кроме такой перекристаллизации магнитных минералов за счет изменения окислительно-восстановительного режима возможно обогащение глубинных пород магнетитом и самородным железом за счет привнесения железа флюидом с низким рН. В настоящее время все больше как теоретических, так и экспериментальных доказательств приобретает гипотеза трансмантийных потоков газов и флюидов [Летников и др., 1977; Ларин, 1980; Гантимуров, 1982; Гуфельд и др., 1998; Лукин, 2009; Гуфельд, Матвеева, 2011; Орлюк, Пашкевич, 2012], за счет которых в верхней части мантии и литосфере Зем-

ли могут происходить приведенные выше трансформации магнитных минералов. Косвенным подтверждением трансформации магнитных минералов в особых тектонических зонах верхней мантии Земли могут служить результаты последних работ В. Семенова и М. Петрищева [Семенов, Петрищев, 2016; Semenov, Petrishchev, 2017], в которых показаны существенные временные изменения магнитной проницаемости пород на этих глубинах. Можно считать, что границы между литосферными плитами субдукционного, срединно-океанического и, возможно, коллизионного типов отражают зоны потоков восстановительных флюидов, а также предположить структурообразующую роль последних относительно современных структур и их динамики в зависимости от особенностей строения верхней мантии и литосферы.

Предложенные на качественном уровне возможные «магнитоминералогические» механизмы взаимосвязи сейсмичности Земли с динамикой «мантийно-литосферной» составляющей геомагнитного поля, а именно: погружение магнитных блоков литосферы в верхнюю мантию с последующими изменениями намагниченности за счет их прогрева и трансформации железистых минералов в магнитные или немагнитные разновидности под действием восстановительных флюидов и газов, конечно же, потребуют количественных оценок. Прежде всего необходима оценка типа и намагниченности коры, а также скорости ее погружения в мантию и расчет времени, необходимого для выравнивания температуры с мантийной. При этом особое внимание должно быть обращено на узкий интервал температур вблизи изотермы Кюри ферромагнитных минералов, в пределах которого происходит резкое увеличение магнитной восприимчивости магнетита и самородного железа [Логачев, 1968; Орлюк, 1999]. Такие же оценки необходимы и для второго механизма. Он представляется также весьма интересным и вероятным, так как приуроченность рассмотренной выше аномалии и к срединно-

океаническому хребту, и к зоне субдукции может быть проинтерпретирована изменениями намагниченности пород мантии и коры за счет глубинных флюидов и газов.

**Выводы.** 1. Выполнен анализ пространственно-временных изменений геомагнитного поля и сейсмичности для периода 1950—2015 гг. Для анализа использована 12-я модель Международного геомагнитного аналитического поля Земли  $V_{IGRF-12}$  (2015—2020). Для определения временно-градiente модуля индукции ГМПЗ были созданы числовые массивы данных  $V_{IGRF}$  для периода 1950—2015 гг. по сети  $1^\circ \times 1^\circ$  и интервалом в 5 лет. Вековой ход геомагнитного поля за этот период был разделен путем его осреднения на условно «ядровую» и «мантийно-литосферную» составляющие.

2. Для «ядровой» компоненты поля выделены три фокуса с отрицательным и два с положительным градиентом геомагнитного поля, характеризующиеся существенным западным дрейфом. Градиент поля в этих фокусах за 65 лет находился в пределах от  $-6600$  до  $2000$  нТл (от  $-100$  до  $30$  нТл/год). Для «мантийно-литосферной» компоненты выделено 12 фокусов с положительным и 10 с отрицательным градиентом поля. При этом за 65 лет большая часть фокусов не изменила своего местоположения, а градиент поля составил  $175—490$  нТл ( $2,5—7,5$  нТл/год) для положительных и  $-(220—535)$  нТл ( $-(3,4—8,2)$  нТл/год) для отрицательных величин.

3. Выявлена зависимость между сейсмичностью Земли и вековым ходом (временным градиентом) ее геомагнитного поля с 1950 по 2015 г. — повышенный приростом в целом для северо-восточной области, характеризующейся повышенной сейсмичностью, и пониженный отрица-

тельный градиент для юго-западной области Земли с пониженной сейсмичностью.

4. Установлена приуроченность полос и участков современной сейсмической активности к областям существенного прироста «мантийно-литосферной» компоненты магнитного поля Земли. В тектоническом плане они приурочены к разнотипным зонам сочленения литосферных плит.

5. Предложено два механизма такой связи: а) «температурно-магнитный», обусловленный погружением магнитных блоков океанической коры в зоне субдукции, с последующим изменением намагниченности за счет прогрева; б) «флюидогазово-магнитный», основанный на образовании и трансформации железистых минералов под влиянием трансмантийных газов и флюидов. Оба механизма позволяют впервые на уровне вещества и процессов в верхней мантии и литосфере зон сочленения литосферных плит объяснить на качественном уровне как сейсмичность, так и динамику «мантийно-литосферной» составляющей геомагнитного поля.

*Благодарности.* Авторы благодарны Институту геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины за возможность выполнения данного исследования за счет финансирования в рамках бюджетных тем № III-3-13 «Літосферні і зовнішні джерела геомагнітного поля території України: проблеми геологічної еволюції земної кори, рудо- та нафтогазоносності і екологічного стану доквілля» и № II-7-12 «Геофізичні дослідження будови і динаміки геологічного середовища для зниження небезпеки від загрозливих явищ ендегенного походження на території України та Росії». Особую признательность выражаем проф. О. М. Русакову за полезные замечания и правки, существенно улучшившие статью.

### Список литературы

Андреев Б. А. Геофизические методы в региональной и структурной геологии. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1960. 260 с.

Богданов Ю. А., Павлович В. Н., Шуман В. Н. Спонтанная электромагнитная эмиссия литосферы: состояние проблемы и математические модели. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 4. С. 20—33.

- Гантимуrow А. А. Флюидный режим железо-кремниевых систем. Новосибирск: СО АН СССР, 1982. 106 с.
- Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. Москва: Наука, 2008. 295 с.
- Гульельми А. В., Зотов О. Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями. *Физика Земли*. 2012. № 2. С. 84—87.
- Гуфельд И. Л., Гусев Г. А., Матвеева М. И. Метастабильность литосферы как проявление восходящей диффузии легких газов. *Докл. АН*. 1998. Т. 365. № 5. С. 677—680.
- Гуфельд И. Л., Матвеева М. И. Барьерный эффект дегазации и деструкция земной коры. *Докл. РАН*. 2011. Т. 438. № 2. С. 253—257.
- Колесова В. И. Аналитические методы магнитной картографии. Москва: Наука, 1985. 224 с.
- Кочергин Е. В., Павлов Ю. А., Сергеев К. Ф. Геомагнитные аномалии Курильской и Рюкю островных систем. Москва: Наука, 1980. 127 с.
- Кузнецова В. Г., Максимчук В. Ю., Городиский Ю. М., Никіфорова Н. М., Пронишин Р. С. Дослідження зв'язків сейсмічності Карпат з фазами 11-річного циклу сонячної активності і магнітними бурями з раптовим початком. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 5. С. 849—856.
- Ларин В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. Москва: Недра, 1980. 216 с.
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ОНФЗ РАН, 1995. 36 с.
- Летников Ф. А., Карпов И. К., Киселев А. И., Шкандрый Б. О. Флюидный режим земной коры и верхней мантии. Москва: Наука, 1977. 216 с.
- Лившиц Л. Д., Печерский Д. М., Трухин В. И. Эффект роста остаточной намагниченности при нагревании вюститита. В кн.: *Магнетизм горных пород и палеомагнетизм*. Москва: ИФЗ АН СССР, 1969. С. 13—15.
- Логачев А. А. Магниторазведка. Ленинград: Недра, 1968. 296 с.
- Лыкасов А. А., Рысс Г. М., Власова И. С. Фазовые превращения при восстановлении шлака сульфидной медной плавки продуктами газификации углеродистых восстановителей при температуре 1320 К. *Вестник ЮУрГУ. Сер. «Металлургия»*. 2013. Т. 13. № 1. С. 24—28.
- Лукин А. Е. Самородно-металлические микро- и нановключения в формациях нефтегазовых бассейнов — трассеры суперглубинных флюидов. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 2. С. 61—92.
- Оль А. И. Вековой ход магнитного поля и сейсмичность Земли. *Природа*. 1949. № 12. С. 6—14.
- Орлюк М. І. Магнітна модель земної кори південного заходу Східноєвропейської платформи: Дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 1999. 404 с.
- Орлюк М. И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 6. С. 148—165.
- Орлюк М. І. Теоретичні магнітні моделі континентальних рифтів. *Доп. АН УРСР*. 1991. № 8. С. 115—119.
- Орлюк М. І., Марченко А. В., Роменець А. О. Сейсмічність Землі та вікові зміни її головного магнітного поля. *Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища: Матеріали VI Міжнар. наук. конф.* Львів, 2016а. С. 202—204.
- Орлюк М., Марченко А., Роменець А. Зв'язок сейсмічності Землі та вікових змін її магнітного поля. *Вісник Київського національного університету. Геологія*. 2016б. № 75(4). С. 50—54.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Глубинные источники региональных магнитных аномалий: тектонотипы и связь с трансформными разломами. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 224—234.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Магнитная модель юго-западного края Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 1995. Т. 17. № 6. С. 31—36.
- Орлюк М. И., Пашкевич И. К. Теоретические

- магнитные модели континентальных палеорифтов и островных дуг. *Геофиз. журн.* 1993. Т. 15. № 5. С. 32—41.
- Орлюк М. И., Роменец А. А. Новый критерий оценки пространственно-временной возмущенности магнитного поля Земли и некоторые аспекты его использования. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 1012—1023.
- Орлюк М. И., Роменец А. А. Структура и динамика главного магнитного поля Земли на ее поверхности и в ближнем космосе. *Odessa astronomical publications.* 2011. Т. 24. С. 124—129.
- Романюк Т. В., Ребецкий Ю. Л., Михайлов А. В. Кайнозойская геодинамическая эволюция и тектонофизическая модель Каскадной субдукционной зоны (северо-западная окраина Северной Америки). *Бюл. МОИП. Отг. геол.* 2007. Т. 82. Вып. 5. С. 19—40.
- Русаков О. М. Магнитное поле Земли в мезозое. Киев: Наук. думка, 1969. 146 с.
- Пашкевич И. К., Мозговая А. П., Орлюк М. И. Объемная магнитная модель Крыма и сопредельных регионов применительно к сейсмическому районированию. В кн.: *Геодинамика и глубинное строение сейсмогенных зон Украины.* Киев: Наук. думка, 1993. С. 9—18.
- Петрова Г. Н. Вековые вариации и граница ядро-мантия. Результаты исследований по международным геофизическим проектам. В кн.: *Геомагнитные исследования.* № 17. Москва: Наука, 1976. С. 15—21.
- Петромагнитная модель литосферы. Ред. Д. М. Печерский. Киев: Наук. думка, 1994. 175 с.
- Почтарев В. И. Нормальное магнитное поле Земли. Москва: Наука, 1983. 268 с.
- Симоненко Т. Н. Строение магнитоактивной оболочки континента. Результаты исследований по международным геофизическим проектам. В кн.: *Геомагнитные исследования.* № 17. Москва: Наука, 1976. С. 53—58.
- Семенов В., Петришев М. Годовые вариации сопротивления Земли и их связь с тектоническими зонами в Евразии. *Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища: Матеріали VI Міжнар. наук. конф.* Львів, 2016. С. 259—260.
- Сергеева Н. Г., Оглоблина О. Ф., Черняков С. М. Сильные землетрясения и их влияние на полярную нижнюю ионосферу. *Вестник МГТУ.* 2009. № 2(12). С. 328—337.
- Собисевич Л. Е., Канониди К. Х., Собисевич А. Л. Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений. *Докл. АН.* 2010. Т. 435. № 4. С. 548—553.
- Собисевич Л. Е., Канониди К. Х., Собисевич А. Л., Мисеюк О. И. Геомагнитные возмущения в вариациях магнитного поля Земли на этапах подготовки и развития Турецкого (08.03.2010 г.) и Северокавказского (19.01.2011 г.) землетрясений. *Докл. АН.* 2013а. Т. 449. № 1. С. 93—96.
- Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониди К. Х. Аномальные геомагнитные возмущения, наведенные катастрофическими цунамигенными землетрясениями в районе Индонезии. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 22—37.
- Собисевич А. Л., Старостенко В. И., Собисевич Л. Е., Кендзера А. В., Шуман В. Н., Вольфман Ю. М., Потемка Э. П., Канониди К. Х., Гарифулин В. А. Черноморские землетрясения конца декабря 2012 г. и их проявление в геомагнитном поле. *Геофиз. журн.* 2013б. Т. 35. № 6. С. 54—71.
- Собисевич А. Л., Рогожин Е. А., Собисевич Л. Е., Канониди К. Х., Кендзера А. В., Марченко А. В., Орлюк М. И. Возмущения геомагнитного поля при Сычуаньском землетрясении 20 апреля 2013 г. (Ms=7.0). *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 37—49.
- Хачикян Г. Я., Жакупов Н. С., Кадырханова Н. Ж. Геомагнитная сопряженность современных тектонических структур. *Геодинамика и тектонофизика.* 2013. Т. 4. № 2. С. 187—195.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 2. С. 4—19.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: новые экспериментальные результаты и анализ проблемы. *Геоінформатика.* 2010. № 4. С. 79—93. <http://dsp.space.nbuv.gov.ua/handle/123456789/95758>.

- Щербина С. В. Корреляционный анализ связи динамики солнечной плазмы и процесса генерации землетрясений. *Геодинамика*. 2013. № 2(15). С. 370—372.
- Ягогин А. П. КаУ-волна предупреждает землетрясение. Хайфа: Akavish, 2015. 78 с.
- Blakely B., Brocher T., Wells R., 2005. Subduction — zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle. *Geology* 33(6), 445—448. doi 10.1130/G21447.1.
- Dunlop D., Ozdemir O., Costanzo-Alvarez V., 2010. Magnetic properties of rocks of the Kapuskasing uplift (Ontario, Canada) and origin- of long-wavelength magnetic anomalies. *Geophys. J. Int.* (183), 645—658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04778.x>.
- Fedorova N. V., Shapiro V. A., 1998. Reference field for the airborne magnetic data. *Earth Planet. Space* 50, 397—404.
- Ferré E., Friedman S. A., Martín-Hernández F., Feinberg J. M., Till J. L., Ionov D. A., Conder J. A., 2014. Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic. *Tectonophysics* 624-625, 3—14. doi 10.1016/j.tecto.2014.01.004.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner-Clausen L., 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth Planet. Space* 68:112. doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Ishimaru S., Arai S., Shukuno H., 2009. Metal-saturated peridotite in the mantle wedge inferred from metal-bearing peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 284(3-4), 352—360. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.042>.
- Hyndman R. D., Peacock S. M., 2003. Serpentinization of the forearc mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212, 417—432. doi:10.1016/S0012-821X(03)00263-2.
- Khachikyan G., Inchin A., Lozbin A., 2012. Spatial distribution of seismicity: relationships with geomagnetic Z-component in geocentric solar magnetospheric coordinate system. *Int. J. Geosci.* 3(5), 1084—1088. doi: 10.4236/ijg.2012.35109.
- Kletetschka G., Wasilewski P., Taylor P., 2002. The role of hematite-ilmenite solid solution in the production of magnetic anomalies in ground- and satellite-based data. *Tectonophysics* 347(1-3), 167—177.
- Mandea M., Korte M. (eds.), 2011. Geomagnetic Observations and Models. IAGA Special Sopron Book Series; Vol. 5. 343 p. doi: <http://doi.org/10.1007/978-90—481-9858-0>.
- Mavrodiev S., Pekevski L., Kikuashvili G., Botev E., Getsov P., Mardirossian G., Sotirov G., Teodossiev D., 2015. On the Imminent Regional Seismic Activity Forecasting Using INTERMAGNET and Sun-Moon Tide Code Data. *Open Journal of Earthquake Research* (4), 102—113. doi: 10.4236/ojer.2015.43010.
- Niu F., Levander A., Ham S., Obayashi M., 2005. Mapping the subducting Pacific slab beneath southwest Japan with Hi-net receiver functions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 239, 9—17. doi:10.1016/j.epsl.2005.08.009.
- Pashkevich I. K., Orlyuk M. I., 1997. Magnetic model of the lithosphere and some problems of Geomagnetic Reference Field. Abstracts, 8th Scientific Assembly of IAGA, Uppsala. P. 485.
- Purucker M. E., Clark D. A., 2011. Mapping and interpretation of the Lithospheric Magnetic Field. In: M. Mandea, M. Korte (eds.). *Geomagnetic Observations and Models*. IAGA Special Sopron Book Series Vol. 5, P. 311—337. doi: 10.1007/978-90—481-9858-0.
- Purucker M., Whaler W., 2007. Crustal magnetism, in Geomagnetism. In: M. Kono. (ed.). *Treatise on Geophysics*. Vol. 5. Ch. 6. Amsterdam: Elsevier, P. 195—237.
- Semenov V., Petrishchev M., 2017. Induction Sounding of the Earth's Mantle. Springer International Publishing AG. 100 p. doi: 10.1007/978-3-319-53795-5.
- Thébault E., Finlay C. C., Beggan C. D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J. M., Lesur V., Lowes F. J., 2015. Special issue «International Geomagnetic Reference Field — the twelfth generation». *Earth Planet. Space* 67:79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0313-0>

- Thébault E., Purucker M., Whaler K. A., Langlais B., Sabaka T. J.*, 2010. The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere. *Space Sci. Rev.* 155(1-4), 95—127. doi: 10.1007/s11214-010—9667-6.
- Wasilewski P. J., Warner R. D.*, 1988. Magnetic petrology of deep crustal rocks — Ivrea Zone, Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 87(3), 347—361. doi: 10.1016/0012-821X(88)90022-2.

## Spatial-temporal changes in the geomagnetic field and seismicity

© M. I. Orlyuk, A. V. Marchenko, A. A. Romenets, 2017

This paper presents the results of an analysis of spatial-temporal changes in the Earth's magnetic field and its seismicity for the period 1950—2015. The International Geomagnetic Field of the 12 generation ( $B_{IGRF-12}$ ) was analyzed. This model allows one to study the characteristic features of magnetic anomalies with dimensions of the first thousands of kilometers. To determine the temporal changes in the geomagnetic field ( $dB/dt$ ), digital datasets of  $B_{IGRF}$  were developed for the period 1950—2015 in a  $1^\circ \times 1^\circ$  grid and for an interval of 5 years. Temporal changes were divided into the virtual long-wave core-generated and short-wave mantle-lithospheric — generated components. There were revealed 2 negative and 3 positive foci of the core-generated component. For the 65 y period the component changes in these foci range from –6600 to 2000 nT (from –100 to 30 nT/y), the foci being characterized by the significant westward drift. 12 positive and 10 negative foci were delineated in the mantle-lithospheric-caused component. During 65 years most of the foci do not change their location. The changes in magnitude of positive and negative foci are 175—490 nT, (2,5—7,5 nT/y) and –(220—535) nT, (–(3,4—8,2) nT/y) respectively. In the southwestern domain of the Earth the intensity of seismicity is lower and the core-originated component is significantly decreased in comparison with the northwestern domain. The relationship is observed between areas of increased seismic activity, foci of the mantle-lithospheric component of the geomagnetic field and areas of its positive increase, which tectonically correspond to the junction zones of lithospheric plates of the «subduction», «collision» and «mid-ocean-rift» types. On the basis of the regularities revealed, two mechanisms of such an association are proposed: a) «temperature-magnetic», caused by descending the magnetic blocks of the oceanic crust in a subduction zone and also serpentinization of ultrabasic rocks of the upper mantle; b) «fluid-gas-magnetic», based on the formation and transformation of ferruginous minerals under the influence of the mantle gases and fluids. The magnetic blocks of the Earth's lithosphere are more solid than those of the non-magnetic. Therefore, within the blocks, as well as on their margins, the accumulation of large stresses is possible and, consequently, the preconditions are created for the formation of earthquake foci.

**Key words:** geomagnetic field, seismicity, lithospheric plates, magnetization, deep fluids.

### References

- Andreev B. A.*, 1960. Geophysical methods in regional and structural geology. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Conservation of Subsoil, 260 p. (in Russian).
- Bogdanov Yu. A., Pavlovich V. N., Shuman V. N.*, 2009. Spontaneous electromagnetic emission of the lithosphere: the state of the problem and mathematic models. *Geofizicheskiy zhurnal* 31(4), 20—33 (in Russian).
- Gantimurov A. A.*, 1982. Fluid regime of iron-silicon systems. Novosibirsk: Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 106 p. (in Russian).
- Gokhberg M. B., Shalimov S. L.*, 2008. The impact of



- earthquakes and explosions on the ionosphere. Moscow: Nauka, 295 p. (in Russian).
- Gulyelmi A. V., Zotov O. D., 2012. About magnetic disturbances before strong earthquakes. *Fizika Zemli* (2), 84—87 (in Russian).
- Gufeld I. L., Gusev G. A., Matveeva M. I., 1998. Metastability of the lithosphere as a manifestation of the ascending diffusion of light gases. *Doklady AN* 365(5), 677—680 (in Russian).
- Gulfeld I. L., Matveeva M. I., 2011. The barrier effect of degassing and destruction of the Earth's crust. *Doklady RAN* 438(2), 253—257 (in Russian).
- Kolesova V. I., 1985. Analytical methods of magnetic cartography. Moscow: Nauka, 224 p. (in Russian).
- Kochergin E. V., Pavlov Yu. A., Sergeev K. F., 1980. Geomagnetic anomalies of the Kurile and Ryukyu island systems. Moscow: Nauka, 127 p. (in Russian).
- Kuznetsova V. G., Maksymchuk V. Yu., Gorodyskyy Yu. M., Nikiforova N. M., Pronyshyn R. S., 2005. Investigation of seismicity of the Carpathians with phases of the 11-year cycle of solar activity and magnetic storms with a sudden start. *Geofizicheskiy zhurnal* 27(5), 849—856 (in Ukrainian).
- Larin V. N., 1980. The hypothesis of the initially hydride Earth. Moscow: Nedra, 216 p. (in Russian).
- Levshenko V. T., 1995. Ultra-low-frequency electromagnetic signals of lithospheric origin: Author's abstract. dis. Dr. phys. and math. sci. Moscow: IPE RAS, 36 p. (in Russian).
- Letnikov F. A., Karpov I. K., Kiselev A. I., Shkandriy B. O., 1977. The fluid regime of the earth's crust and upper mantle. Moscow: Nauka, 216 p. (in Russian).
- Livshits L. D., Pecherskiy D. M., Trukhin V. I., 1969. The effect of growth of residual magnetization upon heating of wustite. In: Magnetism of rocks and paleomagnetism. Moscow: IPE Academy of Sciences of the USSR, P. 13—15 (in Russian).
- Logachev A. A., 1968. Magnetic prospecting. Leningrad: Nedra, 296 p. (in Russian).
- Lykasov A. A., Riss G. M., Vlasova I. S., 2013. Phase transformations during reduction of slag of sulfide copper melting by products of gasification of carbonaceous reductants at 1320 K. *Vestnik SUSU. Ser. «Metallurgy»* 13(1), 24—28 (in Russian).
- Lukin A. E., 2009. Native-metallic micro- and nano-inclusions in formations of oil and gas-bearing basins as tracers of super-deep fluids. *Geofizicheskiy zhurnal* 31(2), 61—92 (in Russian).
- OIA. I., 1949. Century course of the magnetic field and seismicity of the Earth. *Priroda* (12), 6—14 (in Russian).
- Orlyuk M. I., 1999. Magnetic model of the earth's crust of the south-west of the East European platform: Dis. Dr. geol. sci. Kyiv, 404 p. (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., 2000. Spatial and spatial-temporal magnetic models of different-structure structures of the continental type lithosphere. *Geofizicheskiy zhurnal* 22(6), 148—165 (in Russian).
- Orlyuk M. I., 1991. Theoretical magnetic models of continental rifts. *Dopovidi AN URSR* (8), 115—119 (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., Marchenko A. V., Romanets A. O., 2016a. Seismicity of the Earth and age changes of its main magnetic field. *Geophysical technology forecasting and monitoring of the geological environment: Proc. of the VI Int. Conf.* Lviv, P. 202—204 (in Ukrainian).
- Orlyuk M., Marchenko A., Romanets A., 2016b. Relationship of earth's seismicity and age changes in its magnetic field. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu. Heolohiya* (75), 50—54 (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., 2012. Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonotypes and relation with transcrustal faults. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(4), 224—234 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., 1995. Magnetic model of the southwestern edge of the East European platform. *Geofizicheskiy zhurnal* 17(6), 31—36 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Pashkevich I. K., 1993. Theoretical magnetic models of continental paleorifts and island arcs. *Geofizicheskiy zhurnal* 15(5), 32—41 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Romanets A. A., 2005. New criterion

- for estimating the spatiotemporal perturbation of the Earth's magnetic field and some aspects of its use *Geofizicheskiy zhurnal* 27(6), 1012—1023 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Romenets A. A., 2011. Structure and dynamics of the Earth's main magnetic field on its surface and in near space. *Odessa astronomical publications* 24, 124—129 (in Russian).
- Romanyuk T. V., Rebetskiy Yu. L., Mikhaylov A. V., 2007. Cenozoic geodynamic evolution and tectonophysical model of the Cascade subduction zone (north-western margin of North America). *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytatelye prirody. Otdel geologicheskiiy* 82(5), 19—40 (in Russian).
- Rusakov O. M., 1969. Magnetic field of the Earth in the Mesozoic. Kiev: Naukova Dumka, 146 p. (in Russian).
- Pashkevich I. K., Mozgovaya A. P., Orlyuk M. I., 1993. Volumetric magnetic model of Crimea and adjacent regions with reference to seismic zoning. In: *Geodynamics and deep structure of seismogenic zones of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, P. 9—18 (in Russian).
- Petrova G. N., 1976. Century variations and the core-mantle boundary. Results of studies on international geophysical projects. In: *Geomagnetic studies*. No 17. Moscow: Nauka, P. 15—21 (in Russian).
- Petromagnetic model of the lithosphere, 1994. Ed. D. M. Pecherskiy. Kiev: Naukova Dumka, 175 p. (in Russian).
- Pochtarev V. I., 1983. Normal magnetic field of the Earth. Moscow: Nauka, 268 p. (in Russian).
- Simonenko T. N., 1976. The structure of the magnetoactive shell of the continent. Results of studies on international geophysical projects. In: *Geomagnetic studies*. No 17. Moscow: Nauka, P. 53—58 (in Russian).
- Semenov V., Petrishchev M., 2016. Annual variations of the Earth's resistance and their connection with tectonic zones in Eurasia. *Geophysical technology forecasting and monitoring of the geological environment: Proc. of the VI Int. Conf.* Lviv, P. 259—260 (in Russian).
- Sergeeva N. G., Ogloblina O. F., Chernyakov S. M., 2009. Strong earthquakes and their influence on the polar lower ionosphere. *Vestnik MGTU* (2), 328—337 (in Russian).
- Sobisevich L. Ye., Kanonidi K. Kh., Sobisevich A. L., 2010. Observations of ULF geomagnetic disturbances, reflecting the processes of preparation and development of tsunamigenic earthquakes. *Doklady AN* 435(4), 548—553 (in Russian).
- Sobisevich L. Ye., Kanonidi K. Kh., Sobisevich A. L., Miseyuk O. I., 2013a. Geomagnetic disturbances in variations of the Earth's magnetic field at the stages of preparation and development of Turkish (08.03.2010) and North Caucasian (19.01.2011) earthquakes. *Doklady AN* 449(1), 93—96 (in Russian).
- Sobisevich L. Ye., Sobisevich A. L., Kanonidi K. Kh., 2012. Anomalous geomagnetic disturbances induced by catastrophic tsunamigenic earthquakes in the region of Indonesia. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(5), 22—37 (in Russian).
- Sobisevich A. L., Starostenko V. I., Sobisevich L. Ye., Kendzera A. V., Shuman V. N., Volfman Yu. M., Potemka E. P., Kanonidi K. Kh., Garifulin V. A., 2013b. The Black Sea earthquakes of late December 2012 and their manifestation in the geomagnetic field. *Geofizicheskiy zhurnal* 35(6), 54—71 (in Russian).
- Sobisevich A. L., Rogozhin Ye. A., Sobisevich L. Ye., Kanonidi K. Kh., Kendzera A. V., Marchenko A. V., Orlyuk M. I., 2014. Perturbations of the geomagnetic field in the Sichuan earthquake 20 April 2013 (Ms = 7.0). *Geofizicheskiy zhurnal* 36(4), 37—49 (in Russian).
- Khachikyan G. Ya., Zhakupov N. S., Kadyrkhanova N. Zh., 2013. Geomagnetic conjugation of modern tectonic structures. *Geodinamika i tektonofizika* 4(2), 187—195 (in Russian).
- Shuman V. N., 2012. Electromagnetic emission of the lithosphere: do we always adequately interpret what we know about as? *Geofizicheskiy zhurnal* 34(2), 4—19 (in Russian).
- Shuman V. N., 2010. Electromagnetic emission of the lithosphere: new experimental results and analysis of the problem. *Geoinformatika* (4), 79—93 (in Russian). <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/95758>.
- Shcherbina S. V., 2013. Correlation analysis of the connection between the dynamics of solar plasma and the process of earthquake generation. *Geodinamika* (2), 370—372 (in Russian).
- Yagodin A. P., 2015. The KaY-wave prevents an earthquake. Haifa: Akavish, 78 p. (in Russian).
- Blakely B., Brocher T., Wells R., 2005. Subduction

- zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle. *Geology* 33(6), 445—448. doi 10.1130/G21447.1.
- Dunlop D., Ozdemir O., Costanzo-Alvarez V., 2010. Magnetic properties of rocks of the Kapuskasing uplift (Ontario, Canada) and origin of long-wavelength magnetic anomalies. *Geophys. J. Int.* (183), 645—658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04778.x>.
- Fedorova N. V., Shapiro V. A., 1998. Reference field for the airborne magnetic data. *Earth Planet. Space* 50, 397—404.
- Ferré E., Friedman S. A., Martín-Hernández F., Feinberg J. M., Till J. L., Ionov D. A., Conder J. A., 2014. Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic. *Tectonophysics* 624-625, 3—14. doi 10.1016/j.tecto.2014.01.004.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner-Clausen L., 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth Planet. Space* 68:112. doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Ishimaru S., Arai S., Shukuno H., 2009. Metal-saturated peridotite in the mantle wedge inferred from metal-bearing peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 284(3-4), 352—360. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.042>.
- Hyndman R. D., Peacock S. M., 2003. Serpentinization of the forearc mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212, 417—432. doi:10.1016/S0012-821X(03)00263-2.
- Khachikyan G., Inchin A., Lozbin A., 2012. Spatial distribution of seismicity: relationships with geomagnetic Z-component in geocentric solar magnetospheric coordinate system. *Int. J. Geosci.* 3(5), 1084—1088. doi: 10.4236/ijg.2012.35109.
- Kletetschka G., Wasilewski P., Taylor P., 2002. The role of hematite-ilmenite solid solution in the production of magnetic anomalies in ground- and satellite-based data. *Tectonophysics* 347(1-3), 167—177.
- Mandea M., Korte M. (eds.), 2011. Geomagnetic Observations and Models. IAGA Special Sopron Book Series; Vol. 5. 343 p. doi: <http://doi.org/10.1007/978-90-481-9858-0>.
- Mavrodiev S., Pekevski L., Kikuashvili G., Botev E., Getsov P., Mardrossian G., Sotirov G., Teodossiev D., 2015. On the Imminent Regional Seismic Activity Forecasting Using INTERMAGNET and Sun-Moon Tide Code Data. *Open Journal of Earthquake Research* (4), 102—113. doi: 10.4236/ojer.2015.43010.
- Niu F., Levander A., Ham S., Obayashi M., 2005. Mapping the subducting Pacific slab beneath southwest Japan with Hi-net receiver functions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 239, 9—17. doi:10.1016/j.epsl.2005.08.009.
- Pashkevich I. K., Orlyuk M. I., 1997. Magnetic model of the lithosphere and some problems of Geomagnetic Reference Field. Abstracts, 8th Scientific Assembly of IAGA, Uppsala. P. 485.
- Purucker M. E., Clark D. A., 2011. Mapping and interpretation of the Lithospheric Magnetic Field. In: M. Mandea, M. Korte (eds.). *Geomagnetic Observations and Models*. IAGA Special Sopron Book Series Vol. 5, P. 311—337. doi: 10.1007/978-90-481-9858-0.
- Purucker M., Whaler W., 2007. Crustal magnetism, in Geomagnetism. In: M. Kono. (ed.). *Treatise on Geophysics*. Vol. 5. Ch. 6. Amsterdam: Elsevier, P. 195—237.
- Semenov V., Petrishchev M., 2017. Induction Sounding of the Earth's Mantle. Springer International Publishing AG. 100 p. doi: 10.1007/978-3-319-53795-5.
- Thébault E., Finlay C. C., Beggan C. D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lallanne X., Langlais B., Léger J. M., Lesur V., Lowes F. J., 2015. Special issue «International Geomagnetic Reference Field — the twelfth generation». *Earth Planet. Space* 67:79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0313-0>
- Thébault E., Purucker M., Whaler K. A., Langlais B., Sabaka T. J., 2010. The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere. *Space Sci. Rev.* 155(1-4), 95—127. doi: 10.1007/s11214-010-9667-6.
- Wasilewski P. J., Warner R. D., 1988. Magnetic petrology of deep crustal rocks — Ivrea Zone, Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 87(3), 347—361. doi: 10.1016/0012-821X(88)90022-2.

## Формирование изображения глубинного геологического строения по данным морской сейсморазведки МОВ и МПВ

© А. О. Верпаховская, В. Н. Пилипенко, Е. В. Пилипенко, 2017

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина  
Поступила 11 октября 2017 г.

Досліджено можливості формування глибинного зображення геологічного середовища за даними морської сейсморозвідки, зареєстрованими методом відбитих хвиль (МВХ) багаторазовими перекриттями і методом заломлених хвиль (МЗХ) глибинним сейсмічним зондуванням (ГСЗ). Показано різницю в алгоритмах формування зображення середовища із застосуванням скінченно-різницевої міграції поля відбитих і заломлених проникаючих (рефрагованих) хвиль. Розглянуто питання різного завдання швидкісних функцій для продовжень часового і хвильового полів при міграції полів відбитих і рефрагованих хвиль. Виконано оцінювання та порівняння роздільної здатності двох методів міграції. Показано можливість зіставлення і узагальнення їх результатів. Дослідження виконано на прикладі сейсмічних даних, спостережених МВХ багаторазовими перекриттями і МЗХ ГСЗ у районі акваторії Азовського моря.

**Ключові слова:** метод відбитих хвиль, метод заломлених хвиль, глибинне сейсмічне зондування, формування зображення геологічного середовища, скінченно-різницева міграція, продовження хвильового і часового полів, рефраговані хвилі.

**Введение.** Сформировать изображение глубинного строения геологической среды можно благодаря применению сейсмической миграции. Среди существующих методов миграции конечно-разностный подход, как показывает практика и подтверждают научные публикации [Han, 1998; Sinha et al., 2009; Farmer et al., 2009], отличается устойчивостью и точностью решения задачи формирования изображения, что особенно важно при изучении районов со сложным глубинным строением, в частности морских акваторий. Так как основными типами волн, которые являются опорными при миграции, считаются отраженные и преломленные, то, естественно, возникает вопрос о разнице в подходах их обработки и возможности сопоставления полученных при этом результатов для получения наиболее полной информации о структурном строении района исследований.

Конечно-разностный метод сейсмической миграции, который разрабатывается в Институте геофизики им. С.И. Субботина

НАН Украины, является оригинальным, современным и корректным подходом при формировании глубинного изображения разреза района исследований и предусматривает возможность обработки как двумерного, так и трехмерного волнового поля, зарегистрированного в разном диапазоне расстояний от источника [Пилипенко, Верпаховская, 2003; Pilipenko et al., 2011; Пилипенко и др., 2012, 2016; Верпаховская и др., 2013, 2014, 2015]. Таким образом, метод конечно-разностной миграции позволяет обрабатывать сейсмические данные как методом отраженных волн (МОВ), так и методом преломленных волн (МПВ). При этом алгоритмы формирования изображения отличаются между собой, поскольку распространение отраженных и преломленных волн в геологической среде происходит по разному [Pilipenko et al., 2003; Верпаховская, 2011]. Необходимо отметить, что в настоящей статье рассматривается обработка преломленных проникающих или, в дальнейшем, рефрагированных волн.

Морские сейсмические наблюдения преимущественно выполняются с использованием двух систем, первая из которых основана на принципе многократных перекрытий МОВ и ориентирована на обработку отраженных волн с применением суммирования трасс методом общей глубинной точки (МОГТ). Вторая система морских наблюдений предусматривает запись волнового поля на больших расстояниях от источника колебаний с регистрацией рефрагированных волн (МПВ ГСЗ или WARRP). Эти две системы различаются как схемами наблюдений, так и используемым оборудованием для выполнения возбуждения и приема колебаний [Орленок, 1997; Верпаховская и др., 2013]. А это, безусловно, влияет на характер зарегистрированных волновых полей и выбор процедур для их дальнейшей обработки. В случае наблюдений МОВ многократными перекрытиями, как правило, используется односторонняя система наблюдений и сейсмограммы регистрируются общим

пунктом возбуждения, в то время как при МПВ ГСЗ сейсмограммы регистрируются общими приемниками или донными станциями (OBS — ocean bottom station). При этом в МОВ приемники и источники в большинстве случаев расположены регулярно вдоль профиля, а в МПВ ГСЗ шаг между регистраторами и пунктами возбуждения не только неравномерный, но и значительно больше, чем в МОВ.

На рис. 1 показаны примеры волновых полей, наблюдаемых при морской сейсморазведке МОВ (а) и МПВ ГСЗ (б). Часть волнового поля МОВ, показанная на рис. 1, а, представляет собой запись для 11 источников, которая велась 24-канальной косой. Шаг между источниками составлял 12 м, а между приемниками в косе — 3 м. Волновое поле МПВ ГСЗ показано для четырех донных станций (рис. 1, б) с регистрацией колебаний от 1054 источников. Шаг между источниками составлял в среднем около 150 м, а между донными станциями варьировался от 18 до 39 км. На рисунке четко

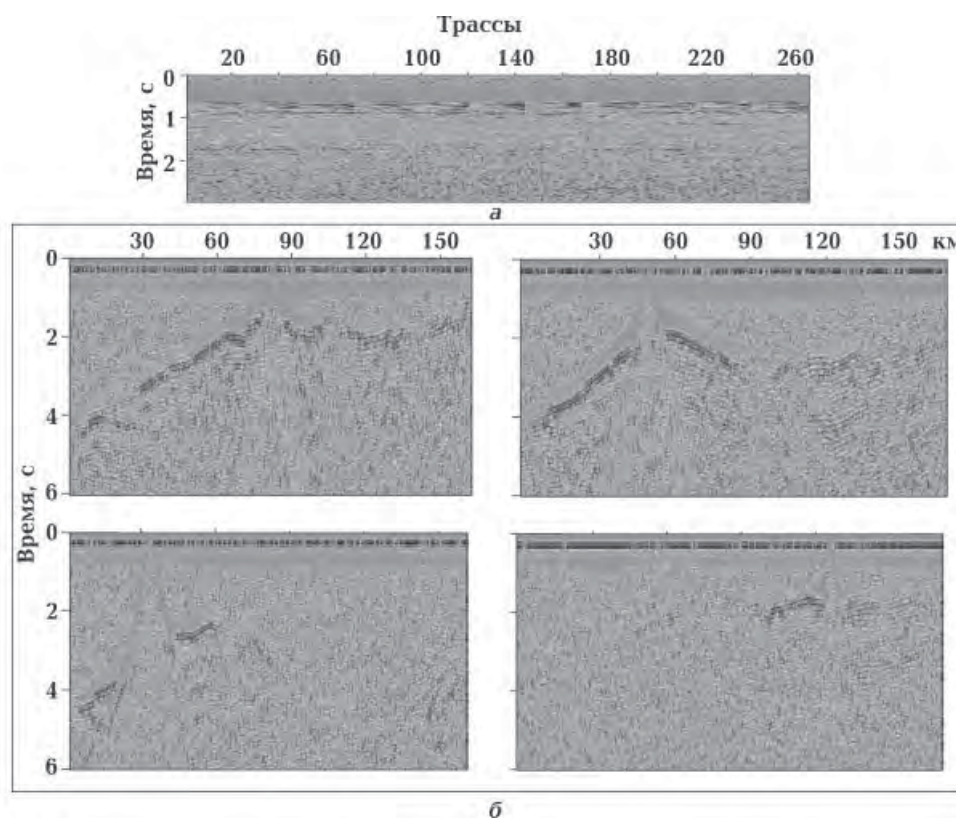


Рис. 1. Волновые поля, наблюдаемые морской сейсморазведкой МОВ (а) с 24-канальной косой и МПВ ГСЗ (б) донными станциями (OBS).

видна разница в характере волнового поля. Если при сейсморазведке МОВ волновое поле каждого источника содержит полезную информацию о строении разреза, то волновые поля для отдельных донных станций могут сильно отличаться друг от друга, что связано с их расположением относительно нарушений, присутствующих в геологической толще. Более подробно эта проблема уже рассматривалась ранее [Piliipenko et al., 2010]. Кроме того, как видно на рис. 1, б, некоторые волновые поля не содержат необходимой информации для дальнейшей обработки (нижние два примера).

Исследование различий в алгоритмах и возможностей формирования изображения среды с применением конечно-разностной миграции по полям отраженных и рефрагированных волн выполнялись на примере обработки части регионального профиля DOBRE-2, которая относится к регистрации данных в Азовском море. Выбор профиля объясняется тем, что наблюдения вдоль него проводились параллельно МОВ многократными перекрытиями (ГПП «Укргеофизика» [Sydorenko et al., 2017]) и МПВ ГСЗ (Международная группа при участии Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины [Starostenko et al., 2012, 2016]), что позволило определить основные различия в методике формирования изображения среды по этим данным, проанализировать их возможности и полученные результаты.

Общим при конечно-разностной миграции до суммы или по наблюдаемым сейсмограммам общего пункта возбуждения поля как отраженных, так и рефрагированных волн является то, что основу алгоритма составляют процедуры обратного продолжения волнового и прямого продолжения временного поля точечного источника. В процессе волнового продолжения по каждому из пунктов возбуждения колебаний в пространственных узлах сетки осуществляется отбор значений амплитуд, которые принадлежат миграционному изображению. Условием этого отбора для изображения является равенство продол-

женного волнового поля времени со значениями временного продолжения. Рассмотрим более подробно различия между формированием изображения среды при обработке данных МОВ и МПВ ГСЗ, наблюдаемых в Азовском море.

**Разница в алгоритмах формирования изображения глубинного строения геологической среды по полю отраженных и рефрагированных волн с применением конечно-разностной миграции.** Алгоритм выполнения конечно-разностной миграции поля как отраженных, так и рефрагированных волн включает прямое продолжение временного поля от источника  $T(x, z)$  и обратное продолжение волнового поля от приемников  $U(x, z, t)$ . Однако существуют некоторые различия между двумя алгоритмами, которые связаны с разным распространением отраженных и рефрагированных волн в геологической среде. На рис. 2 схематически показаны траектории этих двух типов волн при прохождении ими двуслойной среды и этапы алгоритмов выполнения конечно-разностной миграции для обоих случаев. Рассмотрим более подробно разницу в алгоритмах миграции поля отраженных и рефрагированных волн.

Отраженные волны распространяются только в толще, которая характеризуется скоростью  $V_1(x, z)$ . Следовательно, и прямое продолжение временного поля  $T(x, z)$ , и обратное продолжение волнового поля  $U(x, z)$  выполняются с учетом этой скорости. В этом случае изображение среды  $I(x, z)$  формируется по точкам отражения  $K$  (см. рис. 2).

При использовании миграции поля рефрагированных волн происходит формирование изображения не всей среды, а преломляющей границы и прилегающей к ней нижней толще. При этом возникает проблема: поскольку существуют две точки преломления, то встает вопрос о том, относительно какой из них формировать изображение среды. В разработанном варианте конечно-разностной миграции поля рефрагированных волн эта проблема решена путем виртуального переноса источника с земной поверхности в точку  $M$  первого

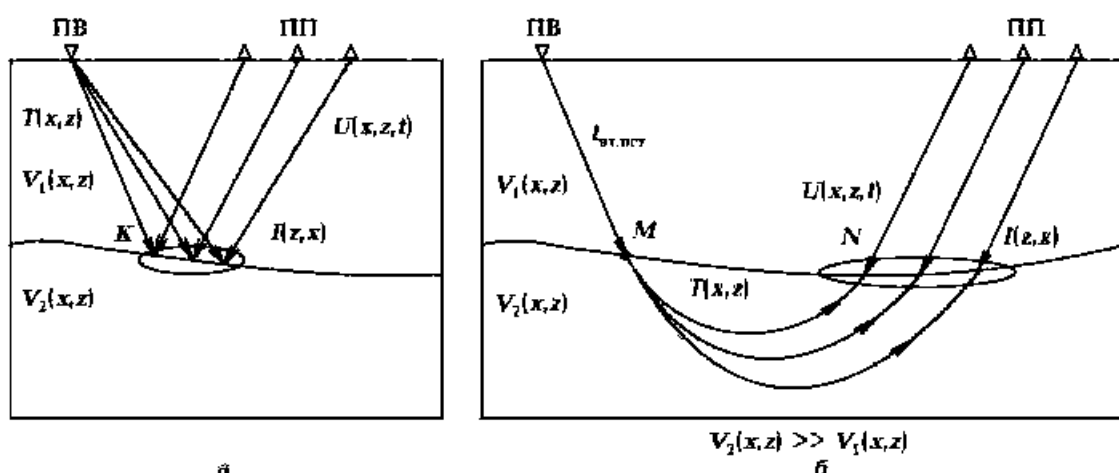


Рис. 2. Траектории распространения и схема выполнения конечно-разностной миграции для отраженных (а) и рефрагированных (б) волн.

преломления волны, что реализуется с помощью пересчета времени  $t_{\text{вг.ист}}$  и тогда формирование изображения происходит по точке второго преломления волн (точка  $N$  на рис. 2) [Пилипенко, Верпаховская, 2003]. Таким образом, согласно рис. 2 для прямого продолжения временного поля требуется задание скорости, характерной для преломляющей толщи  $V_2(x, z)$ , а для обратного продолжения волнового поля — скорости в покрывающей толще  $V_1(x, z)$ .

Как в случае поля отраженных, так и в случае рефрагированных волн продолжения временного и волнового полей выполняются путем конечно-разностного решения дифференциальных уравнений, эйконала и скалярного волнового уравнения соответственно. При этом используются специального вида сетки, которые наиболее полно соответствуют природному распространению сейсмических волн в геологической среде и обеспечивают точность решения.

Прямое продолжение временного поля определяет кинематику тех волн, которые участвуют в формировании глубинного изображения по сейсмическим данным. Временное поле при миграции отраженных волн продолжается непосредственно с земной поверхности и рассчитывается с учетом скорости распространения волн в среде до отражающей границы. При миграции рефрагирован-

ных волн продолжение происходит в два этапа: выполняется виртуальный перенос источника с земной поверхности на преломляющую границу с учетом скорости распространения волн в покрывающей среде, а затем — прямое продолжение временного поля рефрагированных волн с учетом скорости их распространения в преломляющей толще. В обоих случаях теоретической основой продолжения временного поля является решение уравнения эйконала конечно-разностным методом с применением сетки лучей и изохрон. Следовательно, уравнение эйконала, которое стандартно записывается в декартовых координатах:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 - \frac{1}{V^2(x, z)} = 0,$$

с линейно возрастающей с глубиной скоростью в среде  $V=V_0(1+\beta z)$  (где  $\beta$  — константа,  $V_0$  — скорость на земной поверхности в случае отраженных волн или скорость на границе преломления для рефрагированных волн), необходимо преобразовать согласно новой системе координат, основанной на лучах  $\gamma$  и изохронах  $\tau$ :

$$\gamma = \text{arctg} \frac{2x}{\beta(x^2 + z^2) + 2z};$$

$$\tau = \text{arch} \left[ \frac{\beta^2(x^2 + z^2)}{2(\beta z + 1)} + 1 \right],$$

$$\left[ \frac{\partial t(\gamma, \tau)}{\partial \tau} \right]^2 + \frac{1}{\text{sh}^2 \tau} \left[ \frac{\partial t(\gamma, \tau)}{\partial \gamma} \right]^2 - \frac{1}{V^2(\gamma, \tau) \beta^2 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^2} = 0. \quad (1)$$

На рис. 3 показана разница в использовании расчетной сетки лучей  $\gamma$  и изохрон  $\tau$  при прямом продолжении временного поля в случае миграции поля отраженных (рис. 3, а) и рефрагированных (рис. 3, б) волн.

Конечно-разностная задача продолжения временного поля на сетке с четырехточечным шаблоном и в первом, и во втором случае решается по явной схеме с квадратичной степенью приближения:

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \Delta \tau \left[ \frac{\partial t}{\partial \tau} \right] + \frac{\Delta \tau^2}{2} \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} \right],$$

где

$$\left[ \frac{\partial t}{\partial \tau} \right] = \sqrt{\frac{1}{V^2 \beta^2 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^2} - \frac{1}{\text{sh}^2 \tau} \frac{b^2}{4 \Delta \gamma^2}};$$

$$\left[ \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} \right] = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{V^2 \beta^2 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^2} - \frac{1}{\text{sh}^2 \tau} \frac{a^2}{4 \Delta \gamma^2}}} \times$$

$$\times \left\{ \frac{b^2 \text{ch} \tau}{4 \Delta \gamma^2 \text{sh}^3 \tau} \frac{\partial V}{\partial \tau} \frac{1}{\beta^2 V^3 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^2} - \frac{\text{sh} \tau - \cos \gamma \text{ch} \tau}{\beta^2 V^2 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^3} - \frac{1}{2 \Delta \gamma \text{sh}^2 \tau} \sqrt{\frac{1}{V^2 \beta^2 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^2} - \frac{b^2}{4 \Delta \gamma^2 \text{sh}^2 \tau}} \times \left( \frac{\text{sh} \tau \sin \gamma}{\beta^2 V^2 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^3} + \frac{\frac{\partial V}{\partial \gamma}}{\beta^2 V^3 (\text{ch} \tau - \cos \gamma \text{sh} \tau)^2} + \frac{bc}{2 \Delta \gamma^3 \text{sh}^2 \tau} \right) \right\},$$

$$a = t_j^{i+1} - t_j^i; \quad b = t_j^{i+1} - t_j^{i-1}; \quad c = t_j^{i+1} - 2t_j^i + t_j^{i-1}.$$

Разница заключается только в значениях скорости, которые участвуют в расчетах: для отраженных волн — распределение скорости в среде с плавным ее увеличением до заданной глубины ( $V_1$ ), а для рефрагированных волн — распределение скорости в преломляющей толщ ( $V_2$ ).

Условием устойчивости конечно-раз-

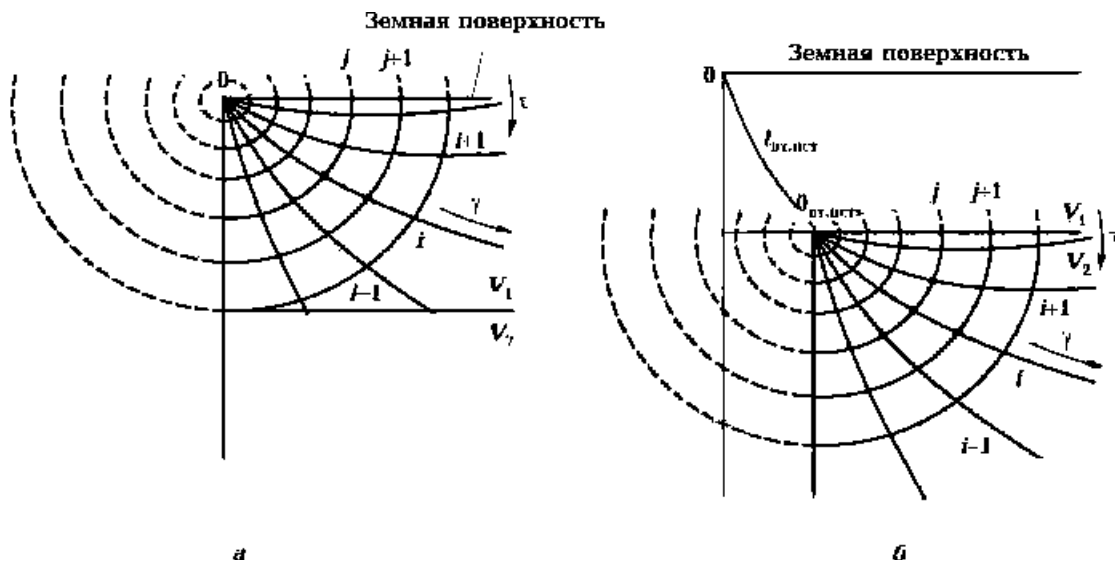


Рис. 3. Вид расчетных сеток при прямом продолжении временного поля в случае миграции поля отраженных (а) и рефрагированных (б) волн.



ностного продолжения временного поля является нахождение луча в пределах ячейки сетки, в которой происходит расчет [Пилипенко, Верпаховская, 2003; Верпаховская и др., 2013]. Поскольку уравнение эйконала является нелинейным, то в связи с резким изменением скорости при сложном строении среды корректность вычисления времени в некоторых узлах сетки по представленной схеме может быть нарушена. Поэтому вычисление происходит сначала в тех узлах, в которых время можно определить, а затем — в пропущенных узлах интерполяцией или экстраполяцией существующих значений, определенных в соседних узлах.

Задача обратного продолжения волнового поля как в случае миграции отраженных, так и в случае миграции рефрагированных волн выполняется путем конечно-разностного решения дифференциального волнового уравнения с аппроксимацией на пространственно-временной сетке:

$$\frac{\partial^2 u(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{V^2(x, z)} \frac{\partial^2 u(x, z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где  $u(x, z, t)$  — амплитуда колебаний в среде.

В случае миграции рефрагированных волн задача решается по неявной схеме с учетом редуцированного волнового поля, что позволяет значительно сократить объем вычислений. Дифференциальное уравнение (2) трансформируется с учетом новой системы координат  $x'=x$ ,  $z'=z$ ,  $t'=t-x/V_r$  со скоростью редукиции волнового поля  $V_r$ :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t'^2} + \frac{2V^2(x', z')V_r}{(V_r^2 - V^2(x', z'))} \frac{\partial^2 u}{\partial x' \partial t'} - \frac{V^2(x', z')V_r^2}{(V_r^2 - V^2(x', z'))} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z'^2} \right) = 0. \quad (3)$$

Конечно-разностное уравнение, которое аппроксимирует дифференциальное уравнение (3) на трехмерной пространственно-временной сетке с шаблоном, изображенном на рис. 4, а, будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} & \left( E - \frac{2V^2(x, z)V_r}{(V_r^2 - V^2(x, z))} \frac{\Delta t}{4\Delta x} L_x - \frac{\sigma \Delta t^2}{\Delta x^2} L_{xx} \right) \times \\ & \quad \times \left( E - \frac{\sigma \Delta t^2}{\Delta z^2} L_{zz} \right) u_{i,j}^{k-1} = \\ & = \left[ 2E - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \left( 2\sigma - \frac{V^2(x, z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x, z)} \right) L_{xx} - \right. \\ & \quad \left. - \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \left( 2\sigma - \frac{V^2(x, z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x, z)} \right) L_{zz} \right] u_{i,j}^k - \\ & \quad - \left( E + \frac{2V^2(x, z)V_r}{V_r^2 - V^2(x, z)} \frac{\Delta t}{4\Delta x} L_x - \right. \\ & \quad \left. - \frac{\sigma \Delta t^2}{\Delta x^2} L_{xx} - \frac{\sigma \Delta t^2}{\Delta z^2} L_{zz} - \right. \\ & \quad \left. - \frac{2V^2(x, z)V_r}{V_r^2 - V^2(x, z)} \frac{\Delta t^3}{4\Delta x \Delta z^2} L_x L_{zz} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\sigma^2 \Delta t^4}{\Delta x^2 \Delta z^2} L_{xx} L_{zz} \right) u_{i,j}^{k+1}, \quad (4) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} L_x &= u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k, \\ L_{xx} &= u_{i+1,j}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i-1,j}^k, \\ L_{zz} &= u_{i,j+1}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i,j-1}^k, \end{aligned}$$

$E$  — единичный оператор,  $\sigma$  — постоянная величина, обеспечивающая устойчивость вычислений. Уравнение (4) решается по неявной схеме с квадратичной степенью точности и имеет абсолютную устойчивость. Схема предполагает расщепление оператора при  $u_{i,j}^{k-1}$  на произведение двух операторов, соответствующих отдельным осям  $x$  и  $z$ . Следовательно, продолжение волнового поля происходит на каждом временном уровне  $k$  последовательно в двух направлениях  $i$  и  $j$ . Задача конечно-разностного продолжения волнового поля при миграции поля рефрагированных волн формулируется как решение уравнения (4) с начальными и краевыми условиями:

$$\begin{aligned} u_{i,j}^k &= u_{i,j}^{k-1} = 0; \quad u_{i,0}^k = U_{i,k}; \\ u_{0,j}^k &= u_{l,j}^k = 0; \quad u_{i,j}^k = 0, \end{aligned}$$

где  $U_{i,k}$  — наблюдаемое на земной поверхности волновое поле.

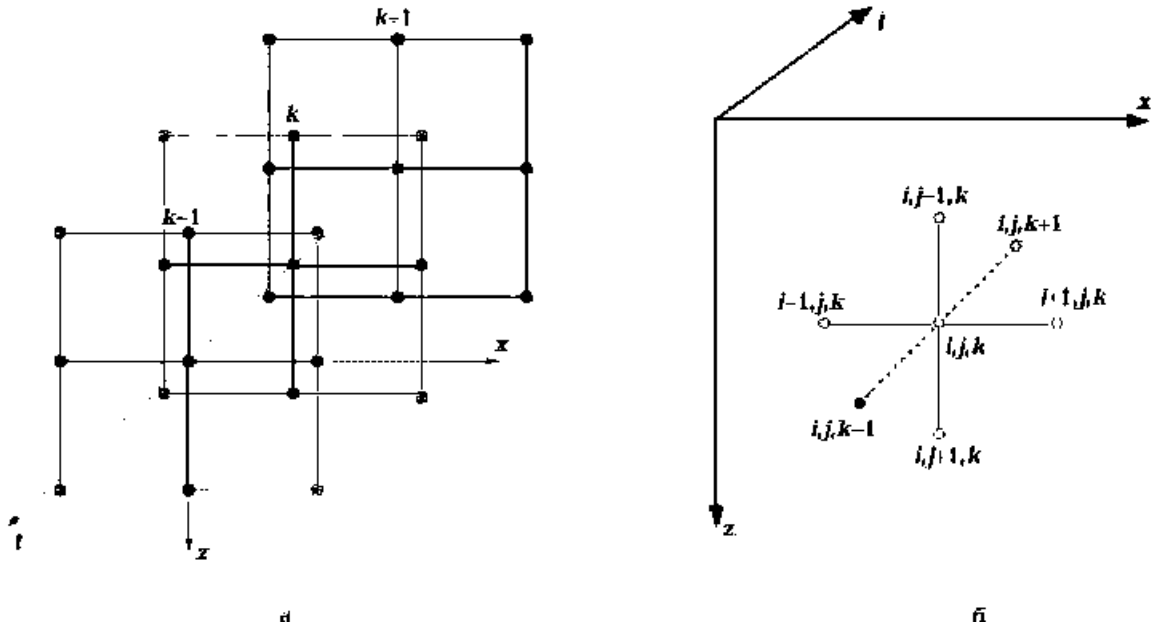


Рис. 4. Шаблоны пространственно-временных расчетных сеток при прямом продолжении временного поля в случае миграции поля рефрагированных (а) и отраженных (б) волн.

Задача обратного продолжения волнового поля при миграции поля отраженных волн предполагает аппроксимацию дифференциального уравнения (2) конечно-разностным на пространственно-временной сетке с семиточечным шаблоном, показанным на рис. 4, б:

$$\frac{(u_{i,j}^{k+1} - 2u_{i,j}^k + u_{i,j}^{k-1}))}{\Delta t^2} = V_{i,j}^2 \left( \frac{(u_{i+1,j}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i-1,j}^k)}{\Delta x^2} + \frac{(u_{i,j+1}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i,j-1}^k)}{\Delta z^2} \right).$$

Дополним задачу начальными и краевыми условиями:

$$u_{i,0}^k = U_{i,k}; u_{i,m}^k = 0; u_{0,j}^k = 0; u_{n,j}^k = 0; u_{i,j}^p = 0; u_{i,j}^{p-1} = 0,$$

где  $n, m, p$  — количество узлов на линиях сетки по осям координат  $x, z, t$  или сеточным координатам  $i, j, k$ .

Задача обратного продолжения волнового поля при миграции поля отраженных

волн решается по явной схеме с квадратичной степенью точности и условной устойчивостью:

$$u_{i,j}^{k-1} = -u_{i,j}^{k+1} + 2u_{i,j}^k \left( 1 - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \right) + \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} (u_{i+1,j}^k + u_{i-1,j}^k) + \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} (u_{i,j+1}^k + u_{i,j-1}^k).$$

Условием устойчивости является неравенство

$$\Delta t \cdot \max_p V_{i,j} \leq \frac{\Delta x \Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}}.$$

После продолжения временного и волнового поля изображение формируется согласно условию

$$I(x, z) = U(x, z, t = T(x, z)),$$

где  $U(x, z, t)$  — продолженное волновое поле,  $T(x, z)$  — продолженное временное поле.

Необходимо также отметить разницу в разрешающей способности миграций поля отраженных и рефрагированных волн. Оценить разрешающую способность миграции можно приблизительно путем со-

поставления определенного интервала волнового поля с отвечающим ему интервалом сформированного изображения. На рис. 5 показана простая двуслойная скоростная модель среды с горизонтальной границей раздела. Был выбран произвольный интервал волнового поля  $MN$ , который на изображении соответствует глубинному —  $\Delta z$ . Во время выполнения обратного продолжения волнового поля фронт волны достигает точки  $N$  с временной задержкой  $\Delta t$  относительно точки  $M$ . Эту временную задержку можно рассчитать по формуле

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{V_1} \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  — угол падения волны,  $V_1$  — скорость в покрывающем слое.

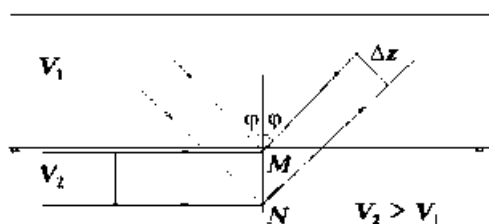


Рис. 5. Сопоставление временного и глубинного интервалов при формировании изображения среды при миграции.

Для вычисления глубинного интервала изображения  $\Delta z$ , в который трансформируется временной интервал  $\Delta t$  волнового поля, запишем следующие выражения: для миграции поля отраженных волн

$$\Delta z = \frac{\Delta t V_1}{\cos \varphi},$$

для миграции поля рефрагированных волн

$$\Delta z = \frac{\Delta t V_1}{\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}}}.$$

Из последнего уравнения видно, что разрешающая способность миграции поля рефрагированных волн тем выше, чем больше разница между скоростями в покрывающей  $V_1$  и в преломляющей  $V_2$  тол-

щах. Очевидно, при равенстве этих двух скоростей миграция поля рефрагированных волн вообще невозможна.

Разрешающая способность миграции по кинематике рефрагированных волн вдвое ниже, чем асимптотическое значение разрешающей способности для отраженных волн. Визуально миграционный глубинный разрез, сформированный по рефрагированным волнам, выглядит более низкочастотным, чем соответствующий ему глубинный разрез, построенный по отраженным волнам. В то же время при применении миграции поля отраженных волн в зоне, удаленной от источника, эта разница в частоте изображений уменьшается.

Таким образом, изображение среды, полученное при миграции поля рефрагированных волн, отличается меньшей разрешающей способностью, чем изображение отраженных волн. Это сказывается на видимой частоте глубинных изображений геологической среды, сформированных по полям отраженных и рефрагированных волн. В то же время конечно-разностная миграция поля рефрагированных волн, о которой говорится в статье, является единственной реальной возможностью сформировать глубинное изображение геологической среды по наблюдаемым данным МПВ ГСЗ.

**Применение конечно-разностной миграции до суммы по исходным сейсмограммам при обработке данных МОВ многократными перекрытиями и МПВ ГСЗ, наблюдаемых в районе Азовского моря.** Для наглядного примера возможностей конечно-разностной миграции полей отраженных и рефрагированных волн была выбрана часть профиля DOBRE-2 в акватории Азовского моря. Наблюдения были выполнены как МОВ [Sydorenko et al., 2017], так и МПВ ГСЗ [Starostenko et al., 2012, 2017].

Система МОВ при сейсмических наблюдениях вдоль части профиля DOBRE-2 в районе Азовского моря предусматривала 240 сейсмоприемников для регистрации волнового поля от каждого пункта

возбуждения, общее количество которых было около 1081 [Sydorenko et al., 2017]. При этом шаг между приемниками составлял 12,5 м, а между источниками — 50 м. Система наблюдений ГСЗ состояла из семи OBS и 1054 пунктов возбуждения с шагом между ними вдоль профиля примерно 150 м [Starostenko et al., 2012, 2017]. Для обработки наблюдаемых волновых полей в обоих случаях была применена конечно-разностная миграция до суммы или по исходным сейсмограммам общего пункта возбуждения (для МОВ) и общего пункта приема (для МПВ ГСЗ).

Уже на подготовительном этапе обработки сейсмических данных наблюдались некоторые различия в применении конечно-разностной миграции полей отраженных и рефрагированных волн. Для

обработки данных МПВ ГСЗ необходимо в исходное поле внести редуцирование со скоростью, соответствующей скорости распространения волн в преломляющей толще, в то время, как для обработки данных МОВ необходимо срезать часть поля, которая не относится к регистрации отраженных волн.

На рис. 6 приведены два волновых поля одного пункта возбуждения, наблюдаемые МОВ (рис. 6, а) и МПВ ГСЗ (рис. 6, б), после этапа их подготовки к применению конечно-разностной миграции. Заметим, что в первом варианте запись одного пункта возбуждения является односторонней и имеет длину не более 3 км, в то время как запись, которая относится к наблюдениям МПВ ГСЗ, является двусторонней относительно OBS и соответствует дли-

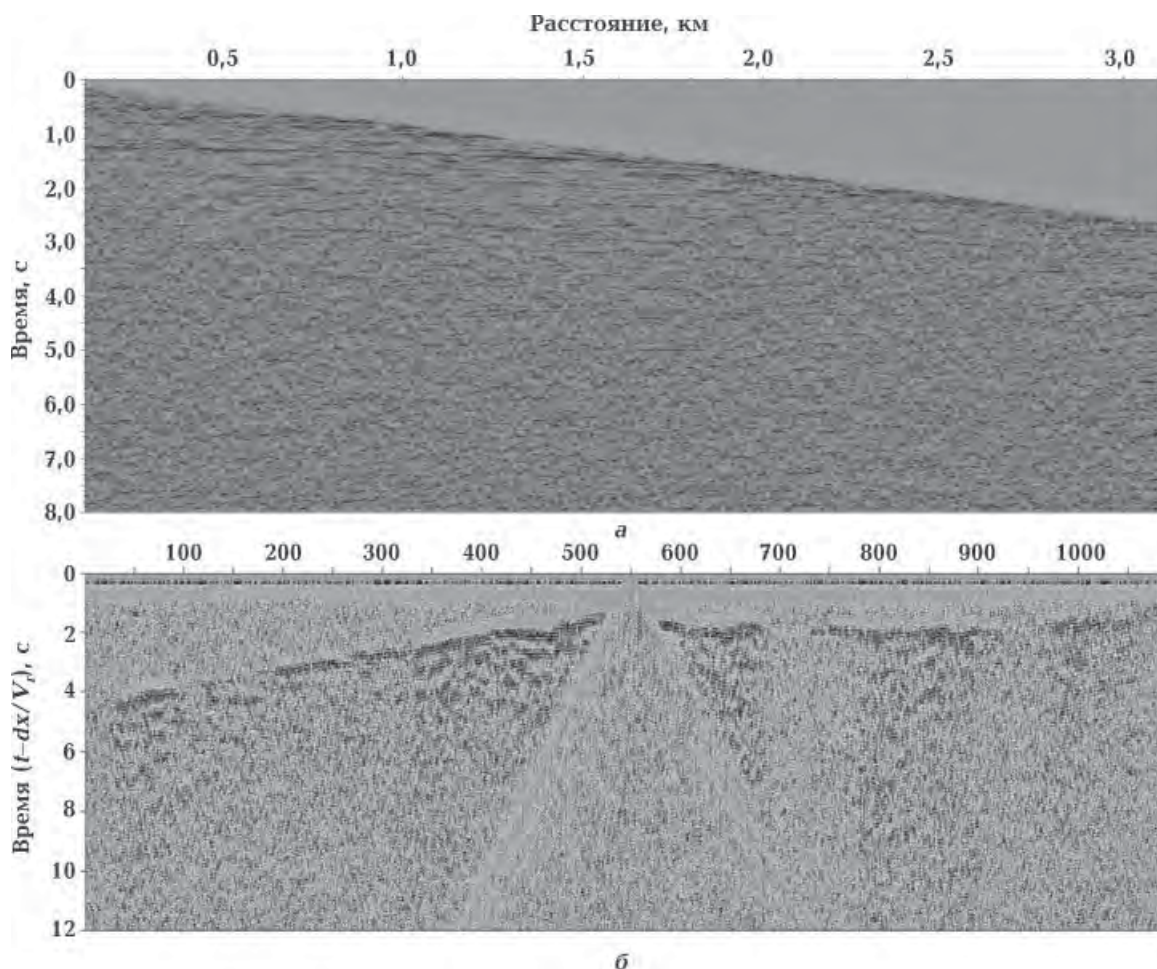


Рис. 6. Подготовленные волновые поля к применению конечно-разностной миграции, наблюдаемые МОВ многократными перекрытиями (а) и МПВ ГСЗ (б).

не всего профиля. После соответствующей подготовки наблюдаемых волновых полей можно применять к ним конечно-разностную миграцию. Для этого необходимо иметь априорно определенную скоростную модель среды. На этом этапе также существует различие, которое заключается в том, что для миграции поля рефрагированных волн необходимо задавать две отдельные скоростные модели для покрывающей и преломляющей толщ. В случае применения миграции поля отраженных волн скоростная модель среды одна и соответствует всей толще, где проходят отраженные волны. При этом значения скорости изменяются плавно и не имеют таких значительных скачков, как

это происходит на границе преломления. После определения скоростных моделей выполняется конечно-разностная миграция для каждого пункта возбуждения. На рис. 7 показаны результаты ее применения к данным одного пункта возбуждения МОВ многократными перекрытиями (рис. 7, а) и МПВ ГСЗ (рис. 7, б).

После получения результатов формирования изображения среды для каждого пункта возбуждения или приема необходимо суммировать их в общий разрез вдоль всего профиля. Рис. 7 показывает еще одно различие в формировании изображения по полям отраженных и рефрагированных волн, заключающееся в том, что при расчетах в случае отраженных

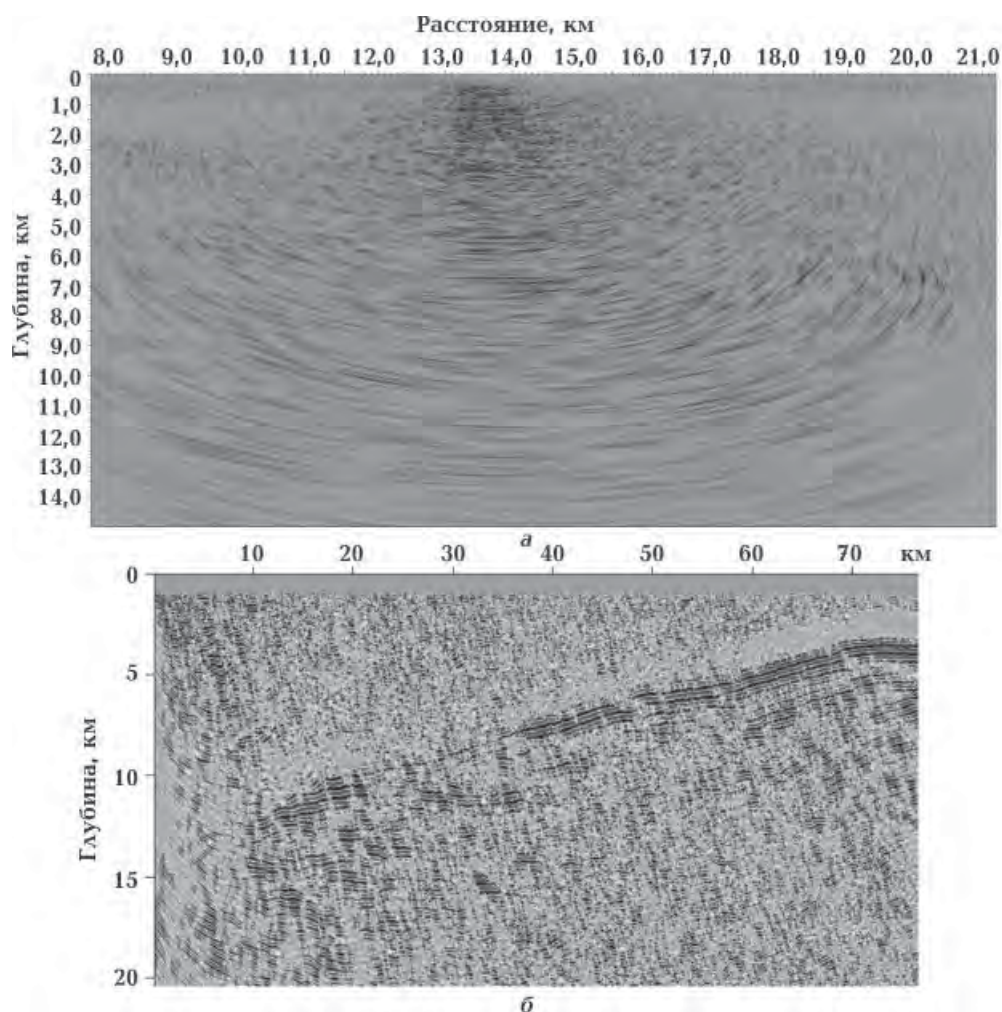


Рис. 7. Результат формирования миграционного изображения по отдельному пункту возбуждения по данным МОВ многократными перекрытиями (а) и МПВ ГСЗ (б).

волн с обоих краев интервала добавляются дополнительные трассы, которые отрезаются при формировании суммарного изображения. Это связано с появлением краевых эффектов на сформированном изображении (рис. 7, а), поскольку учитывается естественное распространение волн в среде.

При обработке данных МПВ ГСЗ метод конечно-разностной миграции поля рефрагированных волн является единственным инструментом на сегодняшний день для формирования изображения глубинного строения геологической среды по данным, зарегистрированным на расстояниях в несколько сотен километров от источника. Сложность разработки методики прежде всего заключается в постановке задачи миграции, необходимости учета проникания рефрагированных волн в толщу с большей скоростью при прохождении границы раздела, а также влияния размещения пункта возбуждения относительно нарушений, которые есть на границе преломления, на характер зарегистрированного волнового поля [Piliipenko et al., 2010]. В результате подобного влияния часть наблюдаемых волновых полей имеет недостаточное качество для обработки, что с учетом нерегулярности системы размещения приемников может привести к недостаточности отдельных миграционных фрагментов для формирования полного изображения преломляющей границы вдоль всего профиля. Поэтому очень часто для получения информации о строении исследуемой среды возникает потребность в сравнении результатов обработки данных, наблюдаемых МПВ ГСЗ и МОВ многократными перекрытиями.

Однако существует некоторое расхождение результатов миграции данных МЗХ ГСЗ и МОВ многократными перекрытиями, которое требует тщательного объяснения, поскольку все описанные ранее особенности и различия этих двух методов сейсморазведки, в частности в системах наблюдений и характере зарегистрированного волнового поля, играют в этом разногласии решающее значение.

Миграция поля рефрагированных волн фиксирует на изображении область только одной контрастной по скорости границы, а не весь разрез, как при миграции поля отраженных волн. В связи с этим на изображении, сформированном по полю рефрагированных волн, как правило нет промежуточных границ, а только та граница, скорость на которой резко изменяется, и прилегающая к ней нижняя толща. Поэтому при наличии двух или более преломляющих границ в исследуемой среде необходимо выполнять миграцию отдельно для каждой из них и затем строить суммарный глубинный разрез [Пилипенко, Верпаховская, 2003; Верпаховская, 2011].

Кроме того, разный частотный состав изображений, полученных по данным ГСЗ и МОВ многократными перекрытиями, позволяет по полю рефрагированных волн выделять более четко отдельные детали строения исследуемой границы. Это приводит к эффекту ощущения разного масштаба глубин на миграционных разрезах, полученных по данным ГСЗ и МОВ многократными перекрытиями.

Следует отметить, что при обработке поля отраженных и рефрагированных волн изображение фиксируется с разных углов подхода волн к точке, по которой формируется изображение. При миграции данных МОВ многократными перекрытиями волна падает сверху на контрастную границу, а при миграции поля рефрагированных волн — сбоку от пункта возбуждения и в глубину преломляющей толщи, что связано с переносом источника на границу преломления. Именно этот различный взгляд на границу позволяет получить дополнительную информацию о строении среды.

На рис. 8 показано сравнение результатов обработки части морского регионального профиля DOBRE-2 с применением конечно-разностной миграции поля отраженных волн к данным МОВ (рис. 8, а) и миграции поля рефрагированных волн к данным МПВ ГСЗ (рис. 8, б).

Как можно видеть на рис. 8, изображение, сформированное по полю рефрагиро-

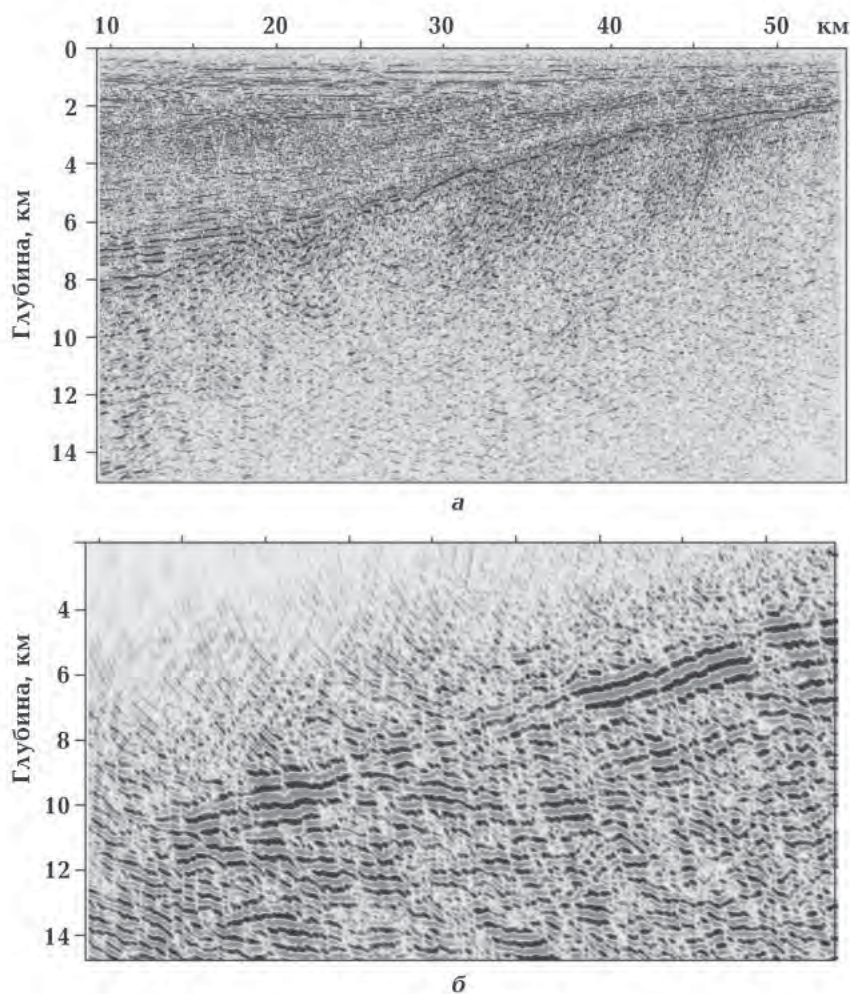


Рис. 8. Результаты обработки сейсмических наблюдений с применением конечно-разностной миграции поля отраженных волн данных МОВ многократными перекрытиями (а) и поля рефрагированных волн данных ГСЗ (б).

ванных волн, отображает строение границы фундамента и преломляющей толщи, в то время как миграция отраженных волн позволяет хорошо отразить именно осадочную толщу, перекрывающую границу фундамента. Таким образом, представленные на рис.8 изображения дополняют друг друга и позволяют получить больше информации об общем строение и глубинном строении геологического разреза в районе исследования.

**Выводы.** Как показано в статье, существует целый ряд принципиальных различий между алгоритмами к миграции полей отраженных и рефрагированных волн, которые объясняются разницей в

распространении этих двух типов волн в двуслойной среде и которые заключаются в следующем.

1. Миграция поля отраженных волн основана на эффекте отражения волн от последовательности отражающих горизонтов. При этом возможно формирование всего глубинного разреза, в то время как миграция поля рефрагированных волн использует эффект прохождения волны через границу двух сред с разной скоростной характеристикой и дает возможность изобразить строение отдельной границы преломления и примыкающей к ней нижней толщ.

2. При миграции поля рефрагирован-

ных волн необходимо задавать две разные функции скорости — для покрывающей и для преломляющей толщ, а при миграции поля отраженных волн — одну функцию скорости для всего разреза. Эти скорости используются при временном и волновом продолжениях.

3. Для сокращения объема вычислений при миграции поля рефрагированных волн необходимо предварительно вносить в исходное волновое поле редукцию, скорость которой соответствует скорости распространения волн в преломляющей толще.

4. Задача обратного продолжения волнового поля в случае миграции поля рефрагированных волн предполагает неявную схему с абсолютной устойчивостью, а в случае миграции поля отраженных волн — явную схему с условной устойчивостью. В то же время в обоих случаях конечно-разностное решение имеет квадратичную степень аппроксимации.

5. Особенности в регистрации отраженных и рефрагированных волн существенно влияют на разницу в выборе области волнового поля, которую необходимо включить в процесс миграции. В большинстве случаев чем больше время зарегистрированного отражения, тем глубже сейсмический горизонт, который связан с этим отражением. В случае рефрагированных волн, как правило, чем дальше от источника, тем глубже горизонт, который связан с волной.

6. Миграция отраженных волн дает полноценный результат только при условии реализации многократной системы перекрытий, которая обеспечивает снятие интенсивных помех разной природы путем суммирования большого количества изображений от отдельных пунктов возбуждения колебаний. Рефрагированные волны, как правило, регистрируются в зоне отсутствия регулярных помех, поэтому могут использоваться с минимальным перекрытием изображений от отдельных пунктов возбуждения колебаний. Этому также способствует то обстоятельство, что при значительном перепаде скорости на границе раздела интервал формирования

изображения преломленной волны значительно превышает интервал изображений по отраженным волнам.

7. Изображение среды, полученное при миграции поля рефрагированных волн, отличается меньшей разрешающей способностью, чем изображение, сформированное по отраженным волнам. Это сказывается на видимой частоте глубинных изображений среды, полученных с их применением. В то же время для формирования глубинного изображения по данным МПВ ГСЗ альтернативы методу конечно-разностной миграции поля рефрагированных волн, рассмотренного в статье, на сегодняшний момент не существует.

При сравнении сформированных изображений по полю отраженных и рефрагированных волн необходимо учитывать значительную разницу между наблюдениями ГСЗ (WARRP) и МОВ многократными перекрытиями, в частности различные плотность и регулярность как возбуждений, так и регистрации колебаний. Особенности волнового поля, зарегистрированного МПВ ГСЗ и МОВ многократными перекрытиями, объясняется принципом отбора трасс: в методе ГСЗ запись происходит одним приемником от многих пунктов возбуждения, т. е. является сейсмограммой общего пункта приема, в то время как в методе МОВ многократными перекрытиями используются сейсмограммы общего пункта возбуждения. Это все влияет на разницу в применении конечно-разностной миграции к данным МПВ ГСЗ и МОВ, которая заключается как в задании скоростных функций среды и параметров миграции, так и в методике формирования изображения среды по полю рефрагированных и отраженных волн. Поэтому для сейсморазведки важно не столько сравнение результатов применения миграции к данным МОВ многократными перекрытиями и МПВ ГСЗ, сколько объединение их для более качественной интерпретации и, следовательно, для получения более полной информации о глубинном строении среды с пространственным положением целевых объектов разведки.



Список литературы

- Верпаховская А. О. Актуальные задачи конечно-разностной миграции поля преломленных волн. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. С. 96—108.
- Верпаховская А. О., Пилипенко В. Н., Бугкевич В. Б. 3D конечно-разностная миграция поля преломленных волн. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 3. С. 50—65. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111102>.
- Верпаховская А. О., Пилипенко В. Н., Пилипенко Е. В., Сигоренко Г. Д. Конечно-разностная миграция волнового поля при изучении глубинного строения морских акваторий. 5-я Международная научно-практическая конференция «Современные сейсмические и другие геолого-геофизические методы при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур (Сейсмо-2014)», Одесса, 7—13 сентября 2014 г. *Расширенные тезисы.* С. 1—4.
- Верпаховская А. О., Сигоренко Г. Д., Пилипенко В. Н., Пилипенко Е. В. Миграция исходных сейсмограмм и моделирование волнового поля конечно-разностным методом с распараллеливанием процесса вычислений на кластере. *Геоинформатика.* 2013. Т. 47. № 3. С. 47—58.
- Орленок В. В. Морская сейсмоакустика. Учеб. пособие. Калининград: Изд-во Калининград. ун-та, 1997. 150 с.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О. Особенности миграционного преобразования поля рефрагированных волн. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 1. С. 42—55.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О., Бугкевич В. Б. Трехмерная временная миграция по исходным данным площадной сейсморазведки. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 1. С. 43—56. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107721>.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О., Гневуш В. В. Конечно-разностная волновая миграция исходных сейсмограмм общего пункта взрыва во временной области. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 3. С. 40—48.
- Пилипенко В. Н., Верпаховская А. О., Кекух Д. А., Пилипенко Е. В. Продолжение временного поля в трехмерной неоднородной среде в процедурах обработки и интерпретации сейсмических данных. *Геоинформатика.* 2011. № 4. С. 32—43.
- Farmer P., Zhou Z., Jones D., 2009. The role of reverse time migration in imaging and model estimation. *TLE* 28(4), 436—441.
- Han B., 1998. A comparison of four depth-migration methods. 68th Ann. Internat. Mtg, SEG. Expanded Abstracts. P. 1104—1107.
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Makris J., Thybo H., 2003. Possible applications of the refraction migration in studies of the crustal structure. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 39(6), 520—526.
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Starostenko V. I., Pavlenkova N. I., 2010. Finite-difference migration of the field of refracted waves in studies of the deep structure of the Earth's crust and the upper mantle based on the DSS (on the example of the DOBRE profile). *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 46(11), 943—954. doi: [10.1134/S1069351310110042](https://doi.org/10.1134/S1069351310110042).
- Pilipenko V. M., Verpakhovska O. O., Starostenko V. I., Pavlenkova N. I., 2011. Wave images of the crustal structure from refractions and wide-angle reflections migration along the DOBRE profile (Dnieper-Donets paleorift). *Tectonophysics* 508, 96—105. doi: [10.1016/j.tecto.2010.11.009](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.11.009)
- Sinha D. P., Vishnoi D. K., Basu S., Singh V. P., 2009. A brief comparison of the efficacy of four migration algorithms — a sub-basalt example. *Geohorizons, SPG. India*, P. 24—27.
- Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Tolkunov A., Czuba W., Sroda P., Lysynchuk D., Omelchenko V., Grad M., Kolomiyets K., Thybo H., Legostaeva O., 2012. Integrated seismic studies of the crust and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE'99 transect. *The 15<sup>th</sup> International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their margins, Seismix 2012.* Programme and Abstracts: Beijing (China) September 16—20. P. 85.
- Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Rusakov O., Czuba W., Sroda P., Grad M., Gu-

terch A., Flúh E., Thybo H., Artemieva I., Tolkunov A., Sydorenko G., Lysynchuk D., Omelchenko V. Kolomiyets K., Legostaeva O., Danowski A., Shulgin A., 2017. DOBRE-2 WARR profile: the Earth's crust across Crimea between the pre-Azov Massif and the north eastern Black Sea Basin. In: M. Sosson, R. A. Stephenson, S. A. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geol. Soc., London, Spec. Publ. doi:10.1144/SP428.11.

Sydorenko G., Stephenson R., Yegorova T., Starostenko V., Tolkunov A., Janik T., Majdanski M., Voitsitskiy Z., Rusakov O., Omelchenko V., 2017. Geological structure of the northern part of the Eastern Black Sea from regional seismic reflection data including the DOBRE-2 CDP profile. In: M. Sosson, R. A. Stephenson, S. A. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geol. Soc., London, Spec. Publ. doi:10.1144/SP428.15.

## Formation geological depth image according to refraction and reflection marine seismic data

© A. Verpakhovska, V. Pilipenko, E. Pylypenko, 2017

The possibility of forming of the geological depth image from marine seismic data observed with the method of reflected waves by multiple overlaps and the refracted method by deep seismic sounding (DSS) was investigated. The difference in the algorithms for creating the depth image using the finite-difference migration on the field of reflected and refracted waves is shown. The problem of different ways of specifying velocity functions for prolongation of temporal and wave fields in case of migration of reflected and refracted waves. Assessment and comparison of resolving power of two migration methods has been accomplished. There is also presented the possibility of comparing and generalizing their results. Researches were carried out using the example of seismic data, observed with the method of reflected waves by multiple overlaps and the refracted method by deep seismic sounding in the area of the Azov Sea.

**Key words:** reflected, refracted wave methods, deep seismic sounding, formation of a deep image, finite-difference migration, continuation of the wave and time fields.

### References

- Verpakhovskaya A. O., 2011. Urgent problems of finite-difference migration of the field of refracted wave. *Geofizicheskiy zhurnal* 33(6), 96—108 (in Russian).
- Verpakhovskaya A. O., Pilipenko V. N., Budkevich V. B., 2015. 3D finite-difference migration of the field of refracted wave. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(3), 50—65 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111102>.
- Verpakhovskaya A. O., Pilipenko V. N., Pilipenko E. V., Sidorenko G. D., 2014. Finite-Difference Migration of the Wave Field in the Study of the Deep Structure of Marine Waters. *The 5th International Scientific and Practical Conference «Modern seismic and other geological and geophysical methods in the search for oil and gas deposits in complex structures (Seismo-2014)», Odessa, September 7—13, Extended theses*. P. 1—4 (in Russian).
- Verpakhovskaya A. O., Sidorenko G. D., Pilipenko V. N., Pilipenko E. V., 2013. Migration of initial seismograms and simulation of the wave field by a finite-difference method with parallelization of the computation process on a cluster. *Geoinformatika* 47(3), 47—58 (in Russian).
- Orlenok V. V., 1997. *Marine Seismoacoustics*. Textbook. Kaliningrad: Publishing house KSU, 150 p. (in Russian).
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., 2003. Peculiarities of the migration transformation of the field of refracted waves. *Geofizicheskiy zhurnal* 25(1), 42—55 (in Russian).
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Budkevich V. B., 2016. Three-dimensional temporal migration according to initial data of areal seismic exploration. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(1), 43—56 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107721>.

- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Gnevush V. V.*, 2012. Finite-difference wave migration of initial seismograms of central explosion point in time domain. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(3), 40—48 (in Russian).
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Kekukh D. A., Pilipenko E. V.*, 2011. Continuation of the time field in a three-dimensional inhomogeneous medium in the processing and interpretation of seismic data. *Geoinformatika* (4), 32—43 (in Russian).
- Farmer P., Zhou Z., Jones D.*, 2009. The role of reverse time migration in imaging and model estimation. *TLE* 28(4), 436—441.
- Han B.*, 1998. A comparison of four depth-migration methods. 68th Ann. Internat. Mtg, SEG. Expanded Abstracts. P. 1104—1107.
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Makris J., Thybo H.*, 2003. Possible applications of the refraction migration in studies of the crustal structure. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 39(6), 520—526.
- Pilipenko V. N., Verpakhovskaya A. O., Starostenko V. I., Pavlenkova N. I.*, 2010. Finite-difference migration of the field of refracted waves in studies of the deep structure of the Earth's crust and the upper mantle based on the DSS (on the example of the DOBRE profile). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46(11), 943—954. doi: 10.1134/S1069351310110042.
- Pilipenko V. M., Verpakhovska O. O., Starostenko V. I., Pavlenkova N. I.*, 2011. Wave images of the crustal structure from refractions and wide-angle reflections migration along the DOBRE profile (Dnieper-Donets paleorift). *Tectonophysics* 508, 96—105. doi: 10.1016/j.tecto.2010.11.009.
- Sinha D. P., Vishnoi D. K., Basu S., Singh V. P.*, 2009. A brief comparison of the efficacy of four migration algorithms — a sub-basalt example. *Geohorizons*, SPG. India, P. 24—27.
- Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Tolkunov A., Czuba W., Sroda P., Lysynchuk D., Omelchenko V., Grad M., Kolomiyets K., Thybo H., Legostaeva O.*, 2012. Integrated seismic studies of the crust and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE'99 transect. *The 15<sup>th</sup> International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their margins, Seismix 2012*. Programme and Abstracts: Beijing (China) September 16—20. P. 85.
- Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Rusakov O., Czuba W., Sroda P., Grad M., Guterch A., Flúh E., Thybo H., Artemieva I., Tolkunov A., Sydorenko G., Lysynchuk D., Omelchenko V., Kolomiyets K., Legostaeva O., Danowski A., Shulgin A.*, 2017. DOBRE-2 WARR profile: the Earth's crust across Crimea between the pre-Azov Massif and the north eastern Black Sea Basin. In: *M. Sosson, R. A. Stephenson, S. A. Adamia (eds). Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geol. Soc., London, Spec. Publ. doi:10.1144/SP428.11.
- Sydorenko G., Stephenson R., Yegorova T., Starostenko V., Tolkunov A., Janik T., Majdanski M., Voitsitskiy Z., Rusakov O., Omelchenko V.*, 2017. Geological structure of the northern part of the Eastern Black Sea from regional seismic reflection data including the DOBRE-2 CDP profile. In: *M. Sosson, R. A. Stephenson, S. A. Adamia (eds). Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geol. Soc., London, Spec. Publ. doi:10.1144/SP428.15.

## Построение графического образа целевого функционала и его использование для поиска многовариантных решений обратной задачи магниторазведки

© М. С. Зейгельман, Н. В. Панченко, 2017

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина  
Поступила 10 октября 2017 г.

Для практичного застосування запропоновано технологію пошуку упорядкованих множин допустимих розв'язків оберненої задачі магніторозвідки. Ця задача орієнтована на використання елементів гарантованого підходу, який реалізується завдяки побудові та аналізу досить широких множин наближено еквівалентних розв'язків.

Розглянуто один з можливих варіантів такого підходу, що ґрунтується на ідеї побудови графічної структури цільового функціонала, задіяного в алгоритмах автоматизованого підбору. Необхідну інформацію можна надавати у вигляді карт проекції графічної структури. Розроблено методику побудови таких карт. Досліджено особливості їх застосування для організації цілеспрямованого пошуку множини допустимих розв'язків оберненої задачі. Наведено приклад багатоваріантного підходу для інтерпретації спостережень аномалії.

**Ключові слова:** обернена задача, магнітна аномалія, магнітна модель, автоматизований добір, цільовий функціонал, карти проекцій.

**Введение.** Известно, что наблюдаемым магнитным или гравитационным аномалиям можно сопоставить более или менее широкие множества (семейства) допустимых решений обратной задачи, практически равнозначных — приближенно эквивалентных друг другу [Страхов, Лапина, 1975; Зейгельман, 1983, 2005]. В связи с этим в последние десятилетия усилился интерес к постановке и реализации гарантирующих подходов к решению обратных задач, ориентированных на поиск многовариантных решений, обобщение содержащейся в них информации [Балк, 1980; Зейгельман, 1989; Балк, Долгаль, 2012]. Практическая реализация таких подходов стала возможной благодаря внедрению методов автоматизированного подбора на ЭВМ и компьютерных технологий.

В практике интерпретации магнитных и гравитационных аномалий широкое применение получили алгоритмы решения обратных задач, основанные на идее метода подбора. Особенностью использо-

вания алгоритмов автоматизированного подбора является необходимость выбора подходящих начальных приближений: тип аппроксимирующей модели и исходных значений ее параметров. Выбирая разные начальные приближения, можно получить при интерпретации наблюдаемых аномалий множество отличающихся друг от друга альтернативных вариантов решений, приближенно эквивалентных друг другу.

В процессе автоматизированного подбора решений обратной задачи возникает целый ряд вопросов принципиального характера. 1. Присутствуют ли среди найденных решений искомые допустимые варианты? Каковы критерии их идентификации (при решении практических задач значения целевого функционала допустимых вариантов отличны от 0)? 2. Достигнута ли максимально возможная в условиях решаемой задачи сопоставимость наблюдаемой и рассчитанной (теоретической) аномалий? 3. Какими начальными приближениями следует задаваться для дальней-

шого поиска? 4. Охватывает ли найденная совокупность вариантов весь возможный диапазон изменения параметров аппроксимирующей модели и т. д.

Ответ на эти и подобные им вопросы предлагается искать в рамках применения гарантирующих подходов к решению обратных задач, ориентированных на поиск представительной выборки допустимых решений, анализ и обобщение содержащейся в них информации. В настоящей статье рассматривается один из возможных вариантов такого подхода, основанный на идее построения графической структуры целевого функционала.

**Краткая характеристика разрабатываемой технологии.** Для практического применения предлагается технология поиска с использованием автоматизированного подбора на ЭВМ упорядоченных множеств допустимых решений обратной задачи [Зейгельман, 2005]. В основу решения задачи положено построение моделей магнитоактивных источников. Поиск допустимых решений реализуется в процессе многократного повторения процедуры автоматизированного подбора от выбранных соответствующим образом начальных приближений. Характеристика использованных алгоритмов автоматизированного подбора приведена в работе [Булах и др., 1986]. Основное назначение технологии — обеспечить возможность оперативного контроля и управления процессом поиска допустимых решений в интерактивном режиме.

Рассматриваемая технология разрабатывалась применительно к таким интерпретационным ситуациям, когда априорные данные весьма ограничены, а основная полезная информация должна быть извлечена из наблюдаемых аномалий. Иными словами, речь идет о задачах небольшой размерности (до десятка варьируемых параметров) и использовании простейших модельных классов — фундаментальных форм для интерпретации магнитных аномалий. В частности, такого типа ситуации зачастую встречаются при количественной интерпретации аномалий,

обусловленных локализованными намагниченными объектами, расположенными в глубинных горизонтах земной коры.

С определенной долей условности в разрабатываемой технологии можно выделить две части: первая ориентирована на исследование теоретических моделей и формирование необходимой экспертной информации, вторая — на разработку методики решения практических задач. В ходе исследования теоретических моделей были проведены обширные серии вычислительных экспериментов, суть которых сводилась к имитации процесса поиска многовариантных решений обратной задачи. Объектами исследований служили модели намагниченных тел различной формы и порождаемые ими на поверхности наблюдений аномалии.

Первоочередное внимание в ходе исследований было уделено модельным классам, которые удовлетворяют условию теоретической однозначности обратной задачи. В частности, были рассмотрены особенности решения обратной задачи для горизонтально расположенной призмы с прямоугольным и трапецеидальным сечением, наклонно падающего пластообразного тела, уступа с вертикально падающей и наклонной боковой гранью и т. д. Помимо идеализированной постановки задачи рассматривались более приближенные к практике интерпретационные ситуации, в которых существуют погрешности исходных данных. Для такого типа задач основные осложнения (практическая многозначность решений) связаны с действием приближенной эквивалентности. В случае локализованных намагниченных тел проявление приближенной эквивалентности обусловлено компенсационным взаимодействием параметров — их способностью сходным образом воздействовать на аномальное поле.

В результате исследования теоретических моделей были сформированы основные положения технологии многовариантного поиска, необходимый объем экспертной информации, обеспечивающий возможность практического применения

технологии при интерпретации наблюдаемых аномалий. В связи со значительным объемом оперативной информации, которую приходится анализировать в процессе многовариантного поиска, особое значение приобретает выбор подходящих способов ее графического отображения (в наглядной, удобной для использования интерпретатором форме). Краткое изложение сущности предлагаемого подхода к графическому отображению информации — в виде карт проекции данных; методика построения таких карт и ее обоснование и составляют основное содержание настоящей статьи.

**Общая постановка обратной задачи.**

*Роль целевого функционала.* Общая постановка обратной задачи, ориентированная на применение методов автоматизированного подбора, основные подходы к ее решению и их конкретная реализация в виде соответствующих алгоритмов достаточно подробно рассматривалась в литературе [Старостенко, 1978; Булах, 2010; Старостенко и др., 2015] и многими другими исследователями. Отметим кратко основные положения, акцентируя внимание на роли целевого функционала в процессе автоматизированного подбора.

Обратная задача решается в рамках выбранной модели, аппроксимирующей распределение аномалиеобразующих источников. Выбранный класс модели характеризуется соответствующей совокупностью параметров, которая может быть представлена вектором  $\mathbf{P}$ . Пусть в этом векторе будет  $m$  параметров. Тогда можно записать

$$\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}; \quad s = 1, 2, \dots, m; \quad \mathbf{P} \in Q, \quad (1)$$

где  $s$  — нумерация параметров модели;  $P_1, P_2, \dots, P_m$  — их обозначение;  $Q$  — функциональное пространство вектора  $\mathbf{P}$ .

Особая роль в алгоритмах автоматизированного подбора принадлежит математической структуре, которую принято называть функцией цели или целевым функционалом (ЦФ). Строятся различные функционалы, с помощью которых сопоставляются между собой поля интерпретируемой и теоретической аномалий, опре-

деляется степень их близости. Под теоретическим здесь подразумевается поле, рассчитанное от модели, аппроксимирующей распределение возмущающих источников. В наиболее общей форме выражение ЦФ можно записать следующим образом:

$$F = \|V_{\text{н}} - V_{\text{т}}\|, \quad (2)$$

где  $V_{\text{н}}$  и  $V_{\text{т}}$  — поля исходной и теоретической аномалий. Выражение (2) определяет расстояние между точками полей — норму их невязки.

Тип целевого функционала зависит от выбора метрики, в которой сопоставляются поля. В случае квадратичной метрики выражение функционала может быть представлено в следующем виде:

$$F = \sum_{i=1}^n [V_{\text{н}}(i) - V_{\text{т}}(i, \mathbf{P}) - A_{\text{ф}}]^2; \\ i = 1, 2, \dots, n; \\ V_{\text{н}} \in W, \quad \mathbf{P} \in Q, \quad (3)$$

где  $i$  — значения поля, которые используются в качестве входных данных при автоматизированном подборе;  $W, Q$  — функциональные пространства полей и решений.

Параметры модели могут принимать различные значения. В этом случае можно говорить о функциональном (параметрическом) пространстве  $Q$ , где каждой реализации численных значений параметров соответствует своя точка такого пространства:  $\mathbf{P} \in Q, j=1, 2, \dots, k$ . Функция  $A_{\text{ф}}$ , которая аппроксимирует постоянную слагающую регионального фона, вычитается из интерпретируемого поля с целью корректировки положения уровня отсчета (нулевого уровня) аномалии, обусловленной локальными возмущающими источниками (аппроксимирующей моделью). Для того или иного варианта решения обратной задачи  $A_{\text{ф}}$  является величиной постоянной для всех точек интерпретируемого поля (как следует из ее наименования). В процессе многовариантного поиска при переходе от одного варианта решения к другому постоянная слагающая фона варьирует совместно со значениями параметров модели, с которыми взаимосвязана.

Координаты точек аномалии  $(x_i, y_i)$  и значения исходного поля в этих точках — величины фиксированные. Отсюда следует, что функционал зависит только от численных значений параметров модели:

$$F = F(\mathbf{P}) = F(p_1, p_2, \dots, p_m). \quad (4)$$

Такой функционал представляет собой нелинейную скалярную функцию параметров.

Интерпретационная задача сводится к минимизации целевого функционала ( $F \rightarrow \min$ ) — выражение (3). Проблеме разработки методов минимизации посвящена достаточно обширная литература, где предложены разнообразные подходы к ее решению. В большинстве алгоритмов обеспечивается монотонная сходимость процесса минимизации.

Алгоритмы минимизации, точнее, разработанные на их основе программы для ЭВМ, предоставляют возможность сформировать минимизирующие последовательности значений параметров модели  $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_k, \dots, \mathbf{P}^*$ . В исходной точке последовательности находится начальное приближение ( $\mathbf{P}_0$ ), в конечной точке параметры модели приобретают значения ( $\mathbf{P}^*$ ), при которых достигается минимально возможное (в условиях заданного начального приближения) значение ЦФ. Такие минимизирующие последовательности, представленные в графическом виде, в дальнейшем тексте будем называть траекториями минимизации.

В выражении (3) представлен простейший тип целевого функционала. В известных алгоритмах автоматизированного подбора находят применение различные, зачастую более сложные виды функционалов. Особую группу составляют функционалы, предназначенные для использования в методах регуляризации некорректно поставленных обратных задач. Но какие бы типы целевых функционалов ни применялись, их основное назначение остается одним и тем же — обеспечить возможность сопоставления исходного и теоретического полей.

**Выбор подхода к поиску многовариантных решений; карты проекций данных.** В связи с ключевой ролью целевого функционала в процессе автоматизированного подбора решений обратной задачи существенное внимание уделялось анализу особенностей его поведения (характеру структуры) в различных интерпретационных ситуациях. Для этой цели были отработаны соответствующие подходы к графическому отображению структуры ЦФ. В ходе исследований выяснилось, что абстрактно-математическому выражению ЦФ, которое задается в алгоритмах автоматизированного подбора, может быть сопоставлено его графическое отображение в виде конкретных геометрических образов; стала очевидной целесообразность использования графических образов структуры функционала для организации целенаправленного поиска и анализа многовариантных решений.

В ходе модельных исследований и интерпретации наблюдаемых аномалий сформировался следующий подход к поиску многовариантных решений. Такой поиск предлагается проводить на основе сопоставления двух следующих видов информации: о множестве найденных (от различных начальных приближений) решений обратной задачи (П-решений); о пространственной структуре целевого функционала. Здесь имеется в виду графическая структура целевого функционала — аналог его абстрактно-математического выражения, которое используется в составе алгоритмов минимизации. Для удобства использования интерпретатором такая информация представляется в наглядной графической (геометрической) форме.

Под П-решением здесь понимается любое приближенное решение обратной задачи, полученное в процессе повторения процедуры минимизации от различных начальных приближений — вне зависимости от качества найденных решений (достигнутого минимального значения ЦФ, характера расположения относительно области минимума и т. д.) Положение П-решений во многих случаях может быть ассоцииро-

вано с финальными точками траекторий минимизации (конечными точками минимизирующих последовательностей значений параметров). В каждом П-решении содержится информация, которая может быть использована для поиска и анализа возможных решений обратной задачи.

Существенной особенностью предлагаемого подхода к многовариантному поиску является использование пространства параметров аппроксимирующей модели для графического отображения целевого функционала и анализа распределения множества найденных приближенных решений. Каждому решению может быть сопоставлена своя точка параметрического пространства и соответствующее ей значение целевого функционала. Это и определило целесообразность использования такого пространства для графического отображения необходимой информации — ее представления в компактном виде.

Графическое отображение ЦФ может быть представлено в виде набора изоповерхностей. Пример графического отображения ЦФ (одной из его изоповерхностей) в пространстве трех параметров намагниченной призмы приведен в работе [Зейгельман, 1989]. На практике в большинстве случаев возникает необходимость графических построений в многомерном пространстве — с числом измерений  $m > 3$  (соответственно, число свободно варьируемых параметров модели).

Построение и анализ структуры ЦФ в многомерном пространстве представляет собой сложную задачу, решение которой требует разработки специальных подходов. Достаточно удобным для практических целей оказалось отображение пространственной структуры ЦФ (ее изоповерхностей) в виде проекций на главные плоскости пространства параметров: координатами таких плоскостей служат возможные парные сочетания параметров модели. В случае проекции на плоскость с координатами  $h, H$  модели будем говорить о плоскости отображения  $h-H$ , в случае  $I_z, h$  — о плоскости  $I_z-h$  и т. д.

Помимо элементов структуры ЦФ на

плоскости отображения выносятся информация о найденных П-решениях. Положение каждого решения ассоциируется с той или иной точкой пространства параметров. Каждое решение, точнее его проекция, выносится на плоскость отображения в виде точки, которой присваивается набор чисел: текущие значения параметров модели и значения ЦФ, найденные в ходе минимизации. Совокупность таких точек-проекций и соответствующие им числовые данные составляют геометрически-числовой образ множества П-решений (в том числе допустимых).

Проекция структуры целевого функционала и множества точек найденных П-решений, представленные на заданных плоскостях отображения, будем называть картами проекции ЦФ (картами проекции данных) или для краткости — картами проекции. Оба вида необходимой информации (о структуре ЦФ множестве найденных П-решений) выносятся в виде проекции на одну и ту же плоскость отображения, что обеспечивает возможность их наглядного сопоставления.

**Сравнительная характеристика карт сечений целевого функционала и карт проекции.** Карты проекции следует отличать от карт сечений целевого функционала, которые получили широкую известность в практике интерпретации [Корчагин, 1978; Ланда, 1978; Пашко, Старостенко, 1982]. Последние иногда называют «картами линий уровня ЦФ» или просто «сечениями ЦФ». Положение плоскостей сечения задается выбором соответствующей пары переменных (координат плоскости сечения) при фиксированных остальных параметрах модели. Принципиальное отличие карт проекции состоит в том, что для графических построений используются, как и в картах сечений, плоскости различных пар переменных, но уже при условии варьирования всеми остальными параметрами модели, что и определяет пространственный характер отображения структуры ЦФ.

Карты сечений обычно используются (на предварительном этапе решения опти-



мизационной задачи) для анализа рельефа ЦФ: его унимодальности или многоэкстремальности, овражности, степени взаимосвязанности различных пар параметров, влияния плохо масштабированных пере-

менных и т. д. Такие данные создают предпосылки для более обоснованного подхода к решению задачи — выбору априорных ограничений, подходящих начальных приближений, режима минимизации парамет-

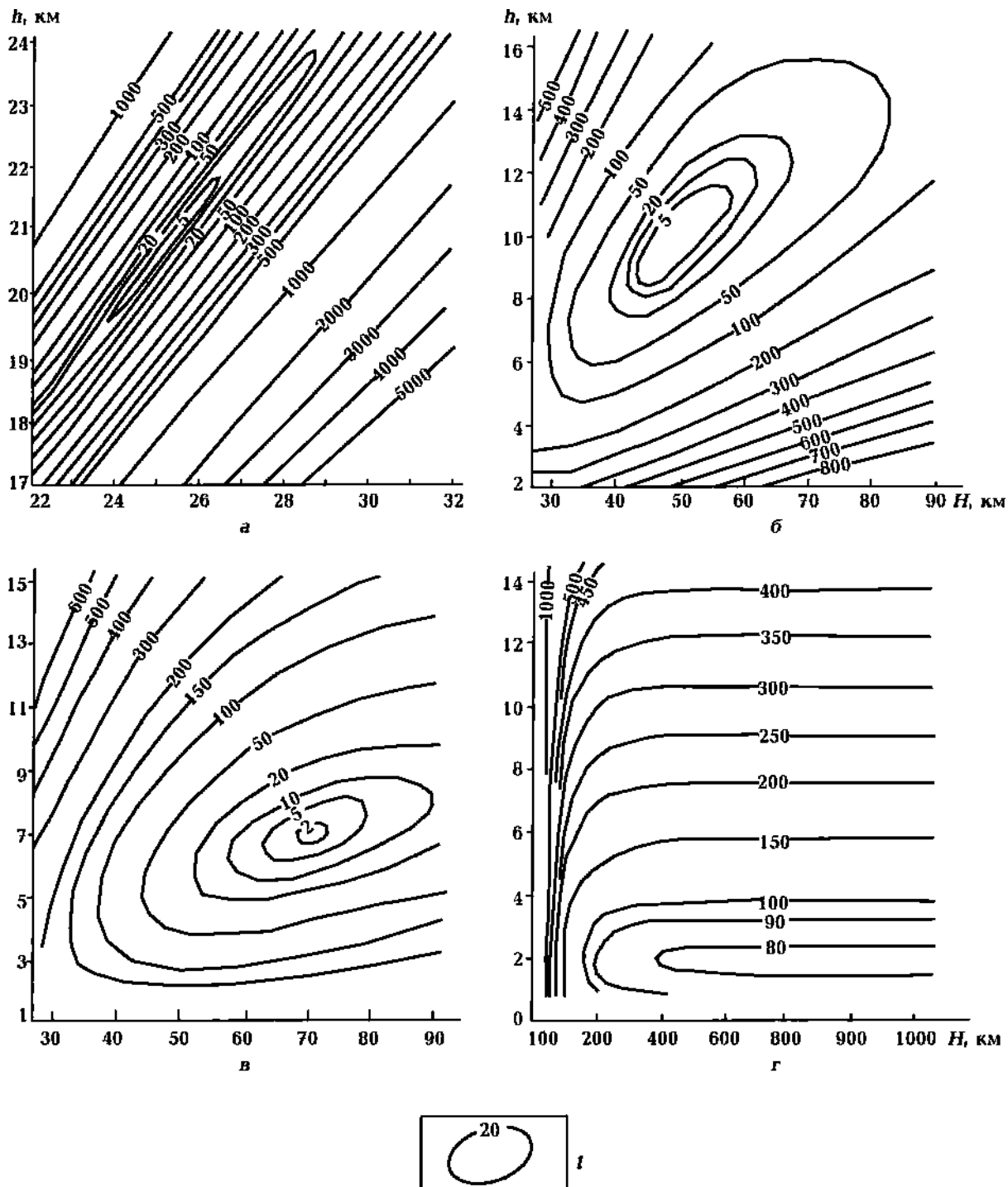


Рис. 1 Модель МП-1; рельеф структуры ЦФ в различных плоскостях  $I_z = \text{const}$  сечений пространства параметров  $h-H-I_z$ : а —  $I_z = 1200 \times 10^{-2}$  А/м; б —  $I_z = 160 \times 10^{-2}$  А/м; в —  $I_z = 120 \times 10^{-2}$  А/м; г —  $I_z = 70 \times 10^{-2}$  А/м (1 — линии рельефа целевого функционала).

тров и т. д. [Ланда, 1978]. Принципиальное отличие карт проекций от карт сечений очевидно из сопоставления рис. 1 и 2.

Одно из основных преимуществ карт

сечений — простота их построения. Для этого достаточно решить прямую задачу — провести скарирование по значениям двух переменных параметров при фик-

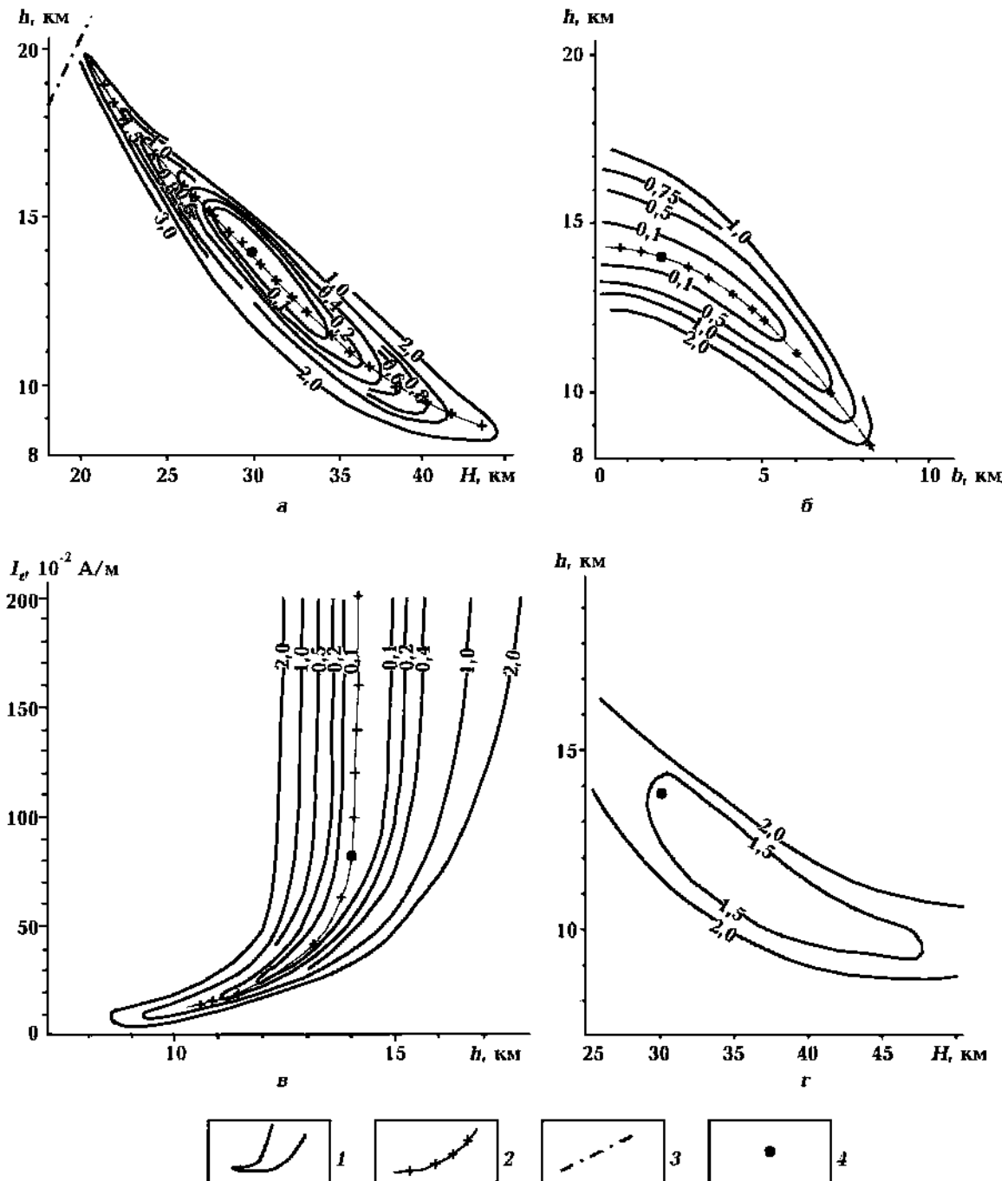


Рис. 2. Намагниченное пластообразное тело (модель МТП-1); «идеализированная» постановка задачи;  $a$ – $в$  — проекции структуры целевого функционала на плоскости пространства параметров;  $г$  — то же на плоскость в случае погрешностей исходных данных (1 — линии проекции изоповерхностей ЦФ; 2–4 — положение осевой линии «оврага» (2), границы области вырождения модели (3), точного решения обратной задачи (4)).

сированных остальных. Существенным недостатком карт сечений, который ограничивает возможность их использования для целей многовариантного поиска, является локальный характер (фрагментарность) отображения структуры ЦФ в виде отдельных срезов. Основываясь на картах сечений, даже их обширной совокупности, зачастую не представляется возможным составить четкую картину поведения ЦФ как пространственной (глобальной) структуры, тем более выразить такие представления в наглядной геометрической форме, пригодной для целей многовариантного поиска.

В гораздо большей мере таким задачам удовлетворяют карты проекции, которые отображают особенности поведения ЦФ как целостной пространственной структуры. На них хорошо просматривается конфигурация изоповерхностей ЦФ (точнее изолиний, которые служат их проекциями), четко выделяется центральная часть структуры, с которой отождествляется положение множества допустимых вариантов. Такие карты удобны для отображения трасс траекторий минимизации, характера их продвижения в различных участках пространства параметров, положения финальных точек траекторий. Алгоритмы автоматизированного подбора, которые использовались для поиска решений обратной задачи [Булах и др. 1986], устроены таким образом, что на каждой итерации процесса минимизации формируются данные о текущих значениях параметров объекта и значениях ЦФ. Каждой итерации можно сопоставить в пространстве параметров точку; совокупность таких точек и составляет траекторию минимизации. Анализируя ход траекторий, можно составить представления об особенностях работы алгоритмов автоматизированного подбора и их разрешающей способности. На рис. 2 в качестве примера представлены проекции структуры ЦФ (ее изоповерхностей) на различные плоскости отображения пространства параметров (применительно к случаю намагниченного вертикально падающего, ограничен-

ного по глубине пластообразного тела). Обозначения параметров модели:  $h$ ,  $H$  — глубина соответственно до верхней и нижней кромок возмущающего тела,  $2b$  — горизонтальная мощность,  $I_z$  — вертикальная составляющая намагниченности. Центральная часть структуры представлена пространственным оврагом, в осевой зоне которого расположено множество допустимых решений обратной задачи. Для сравнения друг с другом приведены проекции на плоскость ( $h-H$ ) для случаев «идеализированной» постановки задачи ( $a$ ), воздействия осложняющих факторов ( $r$ ) — помех в исходной аномалии и варьирование уровня ее отсчета.

**О двух формах отображения целевого функционала.** Согласно изложенному подходу к поиску многовариантных решений в процессе автоматизированного подбора используются две различные формы выражения целевого функционала (ЦФ): абстрактно-математическая (в алгоритмах автоматизированного подбора) и графическая (геометрическая) на картах проекции. Относительно двух указанных форм выражения ЦФ отметим следующее.

Под абстрактно-математической (аналитической) понимается такая форма выражения целевого функционала, когда он представлен в виде соотношения математических символов и знаков операций с ними. Такая форма выражения ЦФ носит обобщенный, универсальный характер; она используется в алгоритмах автоматизированного подбора. Под универсальным характером здесь подразумевается однотипность выражения ЦФ (3) для различных классов моделей. В отличие от символической графическая форма выражения ЦФ индивидуальна для каждой конкретной постановки обратной задачи; одному и тому же абстрактно-математическому выражению может быть сопоставлено множество отличающихся друг от друга графических образов ЦФ, которые соответствуют различным интерпретационным ситуациям.

Как уже отмечалось, в абстрактно-математическом выражении ЦФ содержится информация, которая в значитель-



В качестве выхода из указанной ситуации предлагается вместо структуры ЦФ, представленной в многомерном пространстве, использовать — для многовариантного поиска — ее проекции на выбранные плоскости (гиперплоскости) параметрического пространства. Массив числовых данных, характеризующий проекцию такой структуры, можно представить так:

$$\begin{aligned} & \hat{p}_{11}, \hat{p}_{12}, F_1(\mathbf{P}_1); \\ & \hat{p}_{21}, \hat{p}_{22}, F_2(\mathbf{P}_2); \\ & \dots\dots\dots \\ & p_{j1}, p_{j2}, F_j(\mathbf{P}_j); \\ & \dots\dots\dots \\ & \hat{p}_{k1}, \hat{p}_{k2}, F_k(\mathbf{P}_k); \end{aligned} \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, k; \mathbf{P}_j = \{ \hat{p}_{j1}, \hat{p}_{j2}, p_{j3}, p_{j4}, \dots, p_{jm} \},$$

где  $j$  — нумерация точек проекции целевого функционала,  $s$  — нумерация переменных параметров модели;  $\hat{p}_{j1}, \hat{p}_{j2}$  — значения параметров модели, которые определяют положение точек проекции на плоскости отображения (и самой плоскости в параметрическом пространстве);  $p_{j3}, p_{j4}, p_{jm}$  — значения остальных переменных параметров (характеризуют положение точек проекции в многомерном параметрическом пространстве);  $F_j(\mathbf{P}_j)$  — значения целевого функционала.

Графическое отображение данных, представленных выражением (6), не вызывает особых осложнений — положение точек проекции структуры ЦФ однозначно определяется значениями двух параметров ( $\hat{p}_{j1}, \hat{p}_{j2}$ ). Каждой точке сопоставляется соответствующее значение ЦФ ( $F_j$ ), которое зависит от всей совокупности параметров модели. В ходе исследований был отработан подход к графическому отображению структуры ЦФ (на картах проекции), который позволяет, минуя этап построения многомерной структуры, сразу же переходить к построению ее проекций на заданных плоскостях отображения. Реализация такого подхода обеспечивается благодаря соответствующему выбору траекторий минимизации, которые используются в качестве лучей проецирования для «зонди-

рования» структуры ЦФ. Характер такой структуры (в неявном виде) определяет абстрактно-математическое выражение ЦФ, задействованное в алгоритмах автоматизированного подбора. Основные положения методики построения карт проекции и их обоснование рассматриваются в следующем разделе.

Одна из существенных особенностей предлагаемого подхода к многовариантному поиску состоит в том, что в нем существенно расширена роль алгоритмов автоматизированного подбора: помимо автоматизированного подбора решений (минимизации) алгоритмы используются для формирования информации, характеризующей пространственную структуру целевого функционала. Необходимая информация представляется в графическом виде — карт проекции. Обе задачи взаимосвязаны и решаются параллельно.

**Методика построения карт проекции.**

В отличие от карт сечений построение карт проекции представляет собой гораздо более сложную задачу. Суть проблемы состоит в необходимости осуществить переход от абстрактно-математической формы выражения целевого функционала, задействованной в алгоритмах автоматизированного подбора, к наглядному графическому (геометрическому) отображению его пространственной структуры. Как один из возможных подходов к таким построениям предлагается использовать закономерный, предопределенный абстрактно-математическим выражением ЦФ характер продвижения траекторий автоматизированного подбора (минимизации) в пространстве параметров аппроксимирующей модели. На основе такого подхода разработана методика «зондирования» структуры ЦФ траекториями минимизации, отработанными от соответствующим образом заданных нулевых приближений.

Пространственную структуру ЦФ можно представить в виде набора изоповерхностей. Уточним смысл понятия «проекция изоповерхности» на плоскость отображения. Рассмотрим одну из возможных изо-

поверхностей. В соответствии с правилами построения проекции определим на ней положение точек касания изоповерхности («краевых точек») с лучами проецирования, ортогональными относительно заданной плоскости отображения. Здесь возможны три альтернативы: одна часть лучей пересекает изоповерхность — имеет с ней две общие точки (в случае унимодальности структуры ЦФ); другая часть располагается вне контура изоповерхности (общие точки отсутствуют) и, наконец, третья играет роль касательных к изоповерхности, т. е. имеет с ней одну общую точку.

Совокупность краевых точек составляет «образующую линию» — геометрическое место таких точек. С помощью лучей проецирования можно определить положение образующей линии на плоскости отображения в виде изолинии рельефа ЦФ, которая и служит графическим образом (проекцией) рассматриваемой изоповерхности.

В результате таких построений получим две взаимно отображаемые друг на друга линии — образующую изоповерхности и соответствующую ей изолинию рельефа на плоскости отображения. В зависимости от выбора той или иной плоскости отображения — ее положения в пространстве параметров — образующая линия будет занимать различные положения на изоповерхности, т. е. отличающиеся друг от друга графические образы (проекции) одной и той же изоповерхности. В сочетании друг с другом такие проекции позволяют сформировать представление о конфигурации изоповерхности как пространственной формы.

Возможность использования автоматизированного подбора для построения карт проекции ЦФ следует из анализа геометрических соотношений в мысленно воображаемой системе: изоповерхности ЦФ — лучи проецирования, ортогональные относительно к заданной плоскости отображения. Как следует из результатов анализа, точки касания изоповерхностей с лучами проецирования («краевые точки») отличает одна важная для их идентифика-

ции особенность — им свойственно минимально возможное вдоль рассматриваемого луча проецирования значение ЦФ. Это дает основание рассматривать задачу определения положения «краевых точек» как задачу оптимизации; в качестве лучей проецирования могут быть задействованы траектории минимизации, которые формируются при автоматизированном подборе.

При проецировании структуры ЦФ, представленной в виде набора изоповерхностей, для каждого луча проецирования найдется своя изоповерхность, относительно которой он выполняет роль касательной. Для построения карт проекции необходимо определить значения ЦФ в точках касания и положения последних в пространстве параметров. Положение точки касания характеризуют ее координаты — текущие значения параметров возмущающего объекта.

Как только траектория минимизации достигла точки касания с изоповерхностью (точки с минимальным значением ЦФ), ее дальнейшее продвижение вдоль луча проецирования прекращается, поскольку согласно принципам, определяющим ход процесса минимизации, он не может происходить в сторону возрастающих значений ЦФ [Булах и др., 1986; Булах, 2010]. Отсюда следует, что финальные точки хорошо отработанных траекторий минимизации маркируют положение искомым «краевых точек», проецируемых изоповерхность; «краевым точкам» могут быть присвоены значения параметров объекта и значения ЦФ, найденные в финальных точках траекторий, что и решает задачу формирования данных, необходимых для построения карт проекции.

На практике процесс построения карт проекции выглядит достаточно просто. Траектории минимизации используются в качестве лучей проецирования. Финальные точки хорошо отработанных траекторий в большинстве случаев достигают окрестностей искомым «краевых точек» изоповерхностей. Положение финальных точек траекторий и соответствующее им значения

ЦФ выносятся на плоскость отображения, для которой строится карта проекции. На основе таких данных определяется положение изолиний рельефа — проекций изоповерхностей структуры ЦФ.

При определении положения изолиний проекции следует руководствоваться следующим правилом: внутренность изолинии (в направлении уменьшения величины ЦФ) должна охватывать все точки — решения, у которых значения ЦФ меньше или равны ее оцифровке. Указанное правило связано со свойством изоповерхности охватывать всю возможную совокупность точек пространства параметров, в которых значения ЦФ меньше или равны ее оцифровке. Очевидно, этим свойством должна обладать и линия, представляющая проекцию изоповерхности на плоскости отображения. Во внутренней изолинии могут оказаться и решения с большими, чем ее оцифровка, значениями ЦФ, что не противоречит указанному правилу, а лишь свидетельствует о плохом качестве таких решений — траектории минимизации не достигли минимально возможных (для таких лучей проецирования) значений ЦФ.

Для эффективного использования в качестве лучей проецирования необходимо соответствующим образом управлять траекториями минимизации, обеспечить их попадание в те или иные участки структуры ЦФ. Траектории желательно выбирать таким образом, чтобы их трассы были близки к направлению лучей проецирования, ортогональных относительно рассматриваемой плоскости отображения. Основная задача здесь состоит в том, чтобы та или иная траектория достигла или, по крайней мере, достаточно приблизилась к точке касания с изоповерхностью, которой свойственно минимально возможное вдоль соответствующего луча проецирования значение ЦФ. Возможные способы воздействия на ход траекторий: выбор соответствующих начальных приближений и режимных констант алгоритмов автоматизированного подбора; закрепление тех или иных параметров аппроксимирующей модели, в первую очередь тех, которые

служат координатами плоскости отображения, для которой строится карта проекции.

В завершение раздела сформулируем основные положения предложенного подхода к построению карт проекции.

1. Пространственная структура целевого функционала (ее геометрический образ) представляется в виде набора изоповерхностей. Задача построения карт проекции сводится к определению положения изолиний — проекций изоповерхностей на заданные плоскости отображения в пространстве параметров. Построение таких изолиний можно рассматривать как способ обобщения информации, характеризующей рельеф структуры ЦФ.

2. Предложенный подход к построению карт проекции основывается на результатах анализа геометрических соотношений в мысленно воображаемой системе: изоповерхности — лучи проецирования, ортогональные относительно заданных плоскостей отображения. Для построения проекции изоповерхности необходимо определить положение «образующей линии» — геометрического места точек касания («краевых точек») изоповерхности с лучами проецирования.

3. «Краевые точки» отличает одна важная для их идентификации особенность — в них достигается минимально возможное (вдоль рассматриваемого луча проецирования) значение ЦФ. Это позволило рассматривать задачу определения положения таких точек как задачу оптимизации и применить для ее решения методы автоматизированного подбора; в качестве лучей проецирования используются соответствующие заданные траектории минимизации.

4. Для построения графического образа ЦФ на картах проекции первоочередной интерес представляет информация, которая содержится в финальных точках траекторий минимизации (4). Положение финальных точек и соответствующие им значения ЦФ выносятся на заданные плоскости отображения. В процессе анализа таких данных определяется положение

изолиний — проекций изоповерхностей, составляющих структуру ЦФ.

**Формирование экспертной информации.** При решении обратных задач магниторазведки зачастую используется информация общего характера (назовем ее экспертной), которая заранее формируется при исследовании теоретических моделей и может быть многократно использована при интерпретации наблюдаемых аномалий (атласы теоретических кривых, палетки, номограммы и т. д.). Помимо экспертной в процессе многовариантного поиска широко используется информация оперативного характера — данные о множестве найденных П-решений задачи и соответствующих им значений целевого функционала. Оперативная информация носит индивидуальный характер для каждой конкретной постановки обратной задачи. В связи с применением алгоритмов автоматизированного подбора и реализацией многовариантного подхода к решению обратных задач возникла необходимость существенно расширить состав экспертной информации.

Для формирования необходимой экспертной информации и отработки типовых подходов к решению задач многовариантного поиска был исследован широкий спектр имитационных моделей. Помимо идеализированной постановки задачи рассматривался ряд приближенных к практике интерпретационных ситуаций: исходная аномалия осложнена помехами, в которых присутствуют случайная и систематическая компоненты, имеет место погрешность выбора уровня отсчета аномалии (линейной слагающей фона); выбранная аппроксимирующая модель не адекватна реальному распределению источников и т. д. Для таких исследований были сформированы на основе упомянутых выше классов теоретических моделей соответствующие имитационные модели, на примере которых рассматривался характер воздействия того или иного осложняющего фактора (каждого в отдельности и в сочетании друг с другом).

Для каждой из детально исследованных

имитационных моделей были построены соответствующие наборы (серии) карт — рассматривались проекции на различные плоскости отображения в пространстве параметров. Благодаря таким картам удалось представить в упорядоченном и систематизированном виде обширную информацию, с которой приходится оперировать при многовариантном поиске. В процессе анализа и обобщения информации, представленной на картах проекции, и их сопоставления друг с другом были выделены четыре возможных типа приближенной эквивалентности и соответствующие им типы семейств допустимых решений, которые могут иметь место на практике; сформированы представления по ряду аспектов решения обратных задач, актуальных для многовариантного поиска.

Отметим некоторые из таких аспектов.

1. Сравнительная характеристика стереотипов поведения проекции структуры ЦФ на различные плоскости отображения; степень информативности таких проекций.
2. Особенности взаимодействия параметров намагниченного тела в процессе минимизации: направленность их изменения и характер взаимосвязи друг с другом, способность компенсировать влияние друг друга в исходной аномалии.
3. Возможные искажения структуры ЦФ и семейств допустимых решений из-за воздействия осложняющих факторов.
4. Особенности функционирования и разрешающая способность алгоритмов минимизации и т. д.

Указанную информацию и сформированные на ее основе представления в сочетании с характеристикой исследованных имитационных моделей и построенными картами проекции ЦФ можно рассматривать как своеобразную информационную базу, предназначенную для многократного использования при интерпретации. Степень развития и полнота таких данных в значительной мере предопределяет теоретический уровень и качество решения практических задач.

Как выяснилось при построении карт проекций, в случае теоретически однозначных обратных задач структуру ЦФ



в пространстве параметров можно представить в виде системы вложенных друг в друга изоповерхностей. В центре такой структуры обычно располагается глобаль-

ный (I ранга) овраг, который составляет ядро всей структуры. Положение допустимых (наилучших возможных) решений ассоциируется с наиболее выположенной

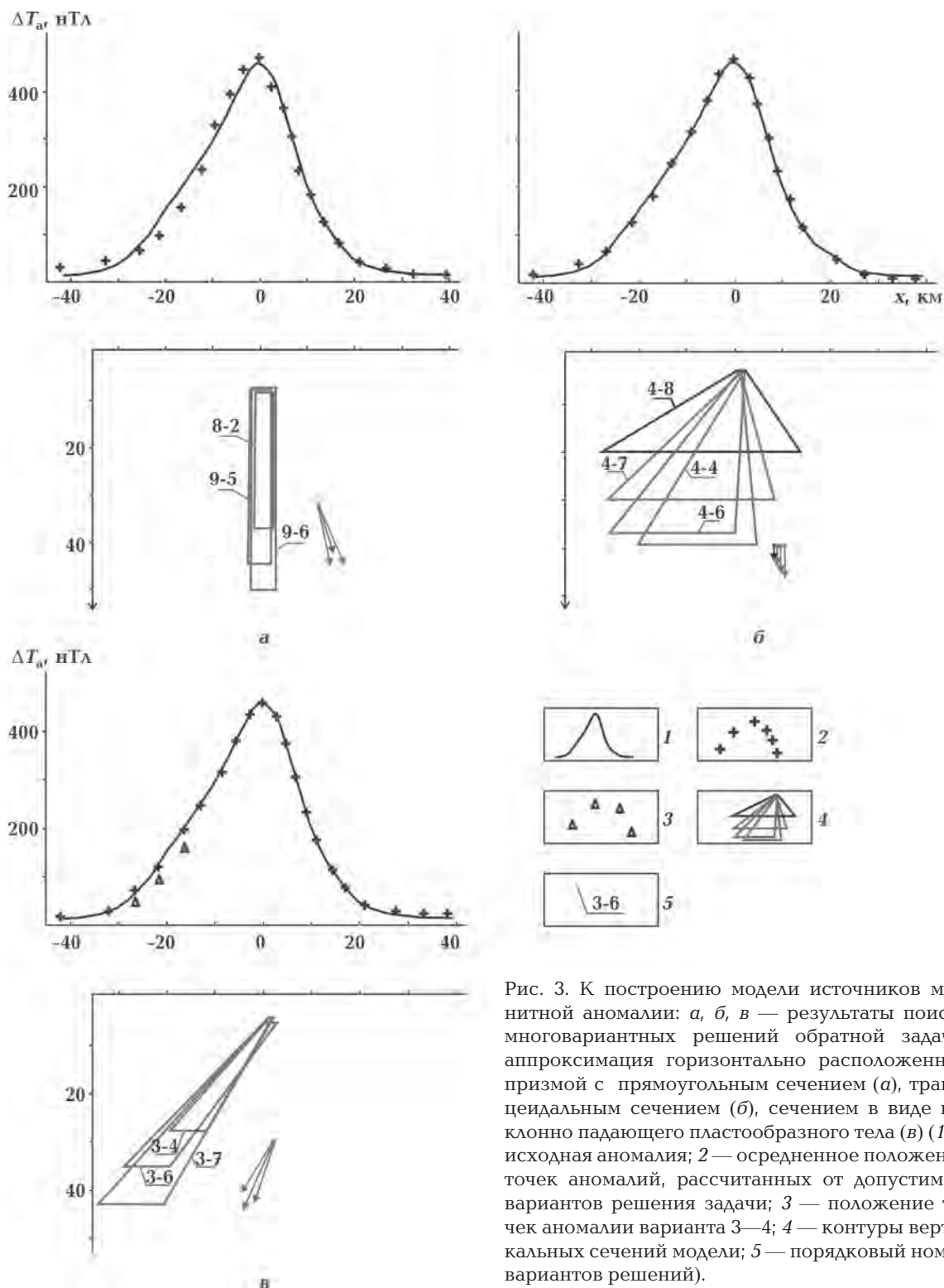


Рис. 3. К построению модели источников магнитной аномалии: *а, б, в* — результаты поиска многовариантных решений обратной задачи; аппроксимация горизонтально расположенной призмой с прямоугольным сечением (*а*), трапециевидальным сечением (*б*), сечением в виде наклонно падающего пластообразного тела (*в*) (1 — исходная аномалия; 2 — осредненное положение точек аномалий, рассчитанных от допустимых вариантов решения задачи; 3 — положение точек аномалии варианта 3—4; 4 — контуры вертикальных сечений модели; 5 — порядковый номер вариантов решений).

частью ядра — его осевой зоной, которой свойственны минимальные значения ЦФ.

Разработанная технология апробировалась на практических примерах. Сошлемся на результаты количественной интерпретации одной из аномалий, расположенных в пределах Черноморского региона — на северном фланге протяженной Алуштинско-Батумской полосы магнитных аномалий. На рис. 3 представлено несколько вариантов решения обратной задачи, которые скомпонованы таким образом, чтобы в наглядном виде представить характер проявления приближенной эквивалентности.

Из приведенных данных следует, как это и можно было ожидать, высокая устойчивость определения положения верхней кромки намагниченного тела (порядка 3—5 км) и значительный разброс положения нижней (20—50 км). В результате интерпретации установлен глубинный характер источников магнитных аномалий. Можно предполагать их связь с палеовулканическими центрами.

**Заключение.** 1. Определена особая роль целевого функционала (ЦФ) при поиске многовариантных решений обратной задачи — с ядром структуры ЦФ ассоциируется положение множества потенциально возможных решений. Это дает основание рассматривать ядро ЦФ как носитель информации о множестве потенциально воз-

можных решений. Отсюда следует, что при решении практических задач нет необходимости исследовать все параметрическое пространство, а можно ограничиться поисками в пределах ядра ЦФ. В таком контексте построение графического образа ядра ЦФ на картах проекции можно рассматривать как своеобразную форму решения обратной задачи в ее многовариантной постановке.

2. Предложен графический способ отображения целевого функционала в виде карт его проекции на плоскости отображения в пространстве параметров аппроксимирующей модели; разработана методика построения карт проекции. Одно из основных назначений таких карт — использование для организации целенаправленного поиска упорядоченных семейств допустимых вариантов.

3. Построение графического образа ядра целевого функционала на картах проекции можно рассматривать как своеобразную форму решения обратной задачи в ее многовариантной постановке.

4. В ходе экспериментов с теоретическими моделями и анализа построенных для них карт проекции ЦФ сформировался достаточный (в первом приближении) объем экспертной информации, которая позволила незамедлительно переходить к построению многовариантных моделей для истолкования наблюдаемых аномалий.

### Список литературы

- Балк П. И. О надежности результатов количественной интерпретации гравитационных аномалий. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1980. № 6. С. 43—57.
- Балк П. И., Долгаль А. С. Обратные задачи гравиметрии как задачи извлечения достоверной информации в условиях неопределенности. *Физика Земли*. 2012. № 5. С. 85—101.
- Булах Е. Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наук. думка, 2010. 463 с.
- Булах Е. Г., Зейгельман М. С., Корчагин И. Н. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных аномалий: программно-алгоритмическое обеспечение и методические рекомендации. Киев, 1986. 236 с. Деп. в ВИНТИ 08.12.86. № 8363.
- Зейгельман М. С. Один тип эквивалентности при оценке глубины залегания намагниченных масс. *Докл. АН УССР. Сер. Б*. 1983. № 8. С. 10—13.
- Зейгельман М. С. Поиск гарантированных решений при автоматизированном подборе магнитных аномалий. *Геофиз. журн.* 1989. Т. 11. № 6. С. 67—76.
- Зейгельман М. С. Технология поиска пред-

- ставительной выборки эквивалентных решений для истолкования магнитных аномалий. В кн.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. Збірник наукових праць*. Київ: Вид-во тов. «Карбон-ЛТД», 2005. С. 166—172.
- Корчагин И. Н. К вопросу о подборе параметров призматического тела по аномальному гравитационному полю методом минимизации. В кн.: *Новые методические разработки в геофизике*. Киев: Наук. думка, 1978. С. 91—97.
- Ланда Е. И. К оценке параметров малоамплитудного сброса методом оптимизации. *Геология и геофизика*. 1978. № 7. С. 80—89.
- Пашко В. Ф., Старостенко В. И. Методы решения прямых и обратных задач гравиметрии и магнитометрии на ЭВМ (по материалам зарубежных публикаций). Обзор информации. Сер. Региональная, разведочная и промысловая геофизика. Москва: ВИЭМС, 1982. 93 с.
- Старостенко В. И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наук. думка, 1978. 228 с.
- Старостенко В. И., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Савченко А. С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto). *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 42—52.
- Страхов В. Н., Лапина М. И. Приближенная эквивалентность и ее использование при решении прямой и обратной задач гравиметрии и магнитометрии. В кн.: *Прикладная геофизика*. Москва: Недра, 1975. С. 149—176.

## The construction of the graphical image of the target functional and its use for the search for multivariant solutions of the inverse magneto-prospecting problem

© M. S. Zeygelman, N. V. Panchenko, 2017

For practical applications, we propose a technology for searching ordered sets of feasible solutions of the inverse magneto-prospecting problem. It is oriented towards using the elements of the guarantee approach, which is realized due to the construction and analysis of fairly broad communities of approximately equivalent solutions.

One of the possible variants of this approach is considered, based on the idea of constructing the graphic structure of the target functional involved in the algorithms for automated selection. The necessary information is represented in the form of maps of the projection of the graphic structure.

A technique for constructing such maps has been developed. The features of their application for organizing a purposeful search for the set of admissible solutions of the inverse problem are considered. An example of a multivariate approach for interpreting anomaly observations is given.

**Key words:** the inverse problem, magnetic anomaly, magnetic model, the automated selection, target functionality, cards of projections.

### References

- Balk P. I., 1980. On the reliability of the results of quantitative interpretation of gravitational anomalies. *Fizika Zemli* (6), 43—57 (in Russian).
- Balk P. I., Dolgal A. S., 2012. Inverse problems of gravimetry as the problem of extracting reliable information in conditions of uncertainty. *Fizika Zemli* (5), 85—101 (in Russian).
- Bulakh Ye. G., 2010. Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry. Kiev: Naukova Dumka, 463 p. (in Russian).

- Bulakh Ye. G., Zeygelman M. S., Korchagin I. N.*, 1986. Automated selection of gravitational and magnetic anomalies: software and algorithmic support and methodological recommendations. Kiev, 236 p. Depositor in the VINITI 08.12.86. No 8363 (in Russian).
- Zeygelman M. S.*, 1983. One type of equivalence in estimating the depth of occurrence of magnetized masses. *Doklady AN USSR. Ser. B* (8), 10—13 (in Russian).
- Zeygelman M. S.*, 1989. Search for guaranteed solutions for automated selection of magnetic anomalies. *Geofizicheskiy zhurnal* 11(6), 67—76 (in Russian).
- Zeygelman M. S.*, 2005. The search technology of a representative sample of equivalent solutions for the interpretation of magnetic anomalies. In: *Theoretical and applied aspects of geoinformatics. Collection of scientific works*. Kyiv: Karbon-ltd, P. 166—172 (in Russian).
- Korchagin I. N.*, 1978. To the problem of selection of parameters of a prismatic body by an anomalous gravitational field by the minimization method. In: *New methodological developments in geophysics*. Kiev: Naukova Dumka, P. 91—97 (in Russian).
- Landa E. I.*, 1978. To the estimation of parameters of low-amplitude fault by optimization method. *Geologiya i geofizika* (7), 80—89 (in Russian).
- Pashko V. F., Starostenko V. I.*, 1982. Methods for solving direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry on a computer (based on foreign publications). Overview of information. Ser. Regional, exploration and field geophysics. Moscow: VIEMS, 93 p. (in Russian).
- Starostenko V. I.*, 1978. Stable numerical methods in problems of gravimetry. Kiev: Naukova Dumka, 228 p. (in Russian).
- Starostenko V. I., Legostaeva O. V., Makarenko I. B., Savchenko A. S.*, 2015. Software system for automated interpretation of potential field (GMT-Auto). *Geofizicheskiy zhurnal* 37(1), 42—52 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111322>.
- Strakhov V. N., Lapina M. I.*, 1975. Approximate equivalence and its use in solving the direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry. In: *Applied Geophysics*. Moscow: Nedra, P. 149—176 (in Russian).

### Актуальные проблемы геосреды и зондирующих систем

© Т. К. Бурахович, В. П. Коболев, 2017

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина  
Поступила 1 ноября 2017 г.

С 3 по 5 октября 2017 г. в Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины проходила III Международная конференция «Актуальные проблемы геосреды и зондирующих систем», посвященная памяти выдающихся ученых — Владимиру Николаевичу Шуману и Сергею Николаевичу Кулику, которые внесли огромный вклад в теорию, методологию и геологическую интерпретацию глубинных электромагнитных зондирований Земли.

Инициатором проведения конференции был Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины при спонсорской поддержке ООО «Юг-нефтегазгеология» и ГПП «Укргеофизика».

С вступительным словом на открытии конференции выступил директор Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, акад. В.И. Старостенко. В частности, он отметил, что в отличие от прошедших двух конференций тематика третьей



В президиуме конференции (слева направо): директор Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины акад. В. И. Старостенко, директор ООО «Юг-нефтегазгеология» Н. П. Лойко, доктор физ.-мат. наук, профессор И. И. Рокитянский, академик НАН Азербайджана Г. Г. Кулиев, первый заместитель генерального директора ГПП «Укргеофизика» канд. геол. наук А. П. Толкунов и Президент Союза геологов Украины канд. геол.-минер. наук П. А. Загороднюк.

Международной научной конференции несколько расширена за счет включения многих теоретических и прикладных задач современной геофизики, связанных с комплексным подходом к исследованию глубинного строения отдельных регионов в сочетании с изучением геологических процессов. Эта конференция — достойный вклад в долю увековечивания памяти ученых-геофизиков в области электромагнитных исследований Земли д-ра физ.-мат. наук Владимира Николаевича Шумана и д-ра геол. наук Сергея Николаевича Кулика.

Отдельным ярким моментом их творческой научной жизни была посвящена презентация доктора геол. наук, профессора **Т. К. Бурахович** (Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев). С теплыми воспоминаниями об отце выступил сын В. Н. Шумана — О. В. Шуман.

Роль академической науки с учетом международной практики, проблем, по-

тенциала и направлений развития были показаны в обстоятельном докладе Президента Союза геологов Украины канд. геол.-минер. наук **П. А. Загороднюка**. В частности, он детально остановился на основных направлениях деятельности созданного на Украине международного хаба TUTKOVSKY как поставщика интегрированных высокотехнологических решений по эффективному, сбалансированному и инвестиционно привлекательному использованию природных ресурсов.

Содержательный доклад директора ООО «Юг-нефтегазгеология» **Н. П. Лойко** был посвящен широкому диапазону современных аппаратурно-методических и экспериментально-интерпретационных сейсморазведочных технологий, апробированных при проведении поисково-разведочных ресурсно-ориентированных работ в Прикаспии (Туркмения) и Тунисе.

Открытие конференции завершилось обширным докладом «История и совре-



В зале заседаний.

менное состояние электромагнитных МТЗ—МВП исследований на Украине» одного из основателей методов глубинной геоэлектрики д-ра физ.-мат. наук, профессора **И. И. Рокитянского** (Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины). Докладчик призвал рассматривать геоэлектрику как фундаментальную науку, которая должна максимально достоверно изучать объективную реальность.

В работе конференции, которая проходила в пленарном режиме последовательно на трех секциях, приняли участие более 50 ученых и специалистов различных научных, производственных и учебных организаций Украины, Польши и Азербайджана, в числе которых 9 докторов и 27 кандидатов наук. Всего на конференции было представлено 42 пленарных и 8 стендовых докладов, которые свидетельствуют о расширении методов анализа геологических процессов и тектонических структур, поиске физических закономерностей в пространственно-временном эволюционном геодинамическом процессе. Детально с материалами конференции можно ознакомиться в специальном издании [Актуальные..., 2017]<sup>1</sup>, а также на сайте Института геофизики <http://www.igph.kiev.ua/>. Остановимся на отдельных, наиболее важных, на наш взгляд, результатах, которые были заслушаны на пленарных заседаниях.

На секции «**Геолого-геофизических модели земной коры и мантии**» было представлено 17 докладов, которые в основном касались глубинного строения различных регионов, полученных по данным электромагнитных исследований как Украины, так и далеко за ее пределами.

Широкий круг актуальных вопросов электромагнитных зондирований мантии Земли был поднят в докладе **Б. Т. Ладановского** (Карпатское отделение ИГФ НАН Украины, Львов) в соавторстве с В. Ю. Семеновым (Институт геофизики Польской

Академии наук, Варшава) и М. С. Петрищевым (Институт Земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн, филиал, Санкт-Петербург). В частности, им была представлена презентация подготовленной к изданию в этом году монографии (Vladimir Semenov and Maxim Petrishchev, 2017, Induction Sounding of the Earth's Mantle), посвященной методам анализа и интерпретации индукционных зондирований мантии Земли. В совместном докладе с соавторами В. Е. Корепановым, А. Н. Пристаем и Ф. Л. Дудкиным (Львовский центр Института космических исследований НАНУ-ГКАУ) была представлена разработка нового типа легкого автономного магнитометра ФЗМ LEM1-026 и приведены результаты полевых наблюдений магнитного поля с борта малых движущихся носителей (дронов).

Серия докладов о технологии пассивной геополяритонной томографии, геологической интерпретации экспериментального материала исследования глубинного строения Земли, полученного на различных объектах во многих странах мира, была представлена **Ю. А. Богдановым, А. А. Водопьяновым, С. И. Прокопенко и И. Н. Федотовой** (ООО «МАК СПЕЦ АВИА ИНДУСТРИЯ», Харьков).

В докладе **А. Н. Кушнера** в соавторстве с Т. К. Бурахович (Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины), И. Ю. Николаевым и Е. М. Шереметом (Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М. П. Семененка НАН Украины) были рассмотрены зоны различной интенсивности и глубины залегания аномалий высокой электропроводности территории Украины.

Компьютерная технология, позволяющая реализовать совместный подбор параметров аппроксимирующей конструкции набором трехмерных стержневых тел по компонентам гравитационного и магнитного полей одновременно и по каждому отдельно, была предложена в докладе Т. Л. Михеевой, Е. П. Лапиной, **Н. В. Панченко** (Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины).

<sup>1</sup> Актуальные проблемы геосреды и зондирующих систем: материалы Третьей Международной научной конференции (Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, 3—5 октября 2017 г.). Киев: Талком, 2017. 130 с.

Широкий круг теоретических, методологических и прикладных задач был рассмотрен в 23 докладах на секции «**Геодинамика, глубинное строение и полезные ископаемые**».

Пленарное заседание этой секции открыл академик НАН Азербайджана **Г. Г. Кулиев** (Институт геологии и геофизики НАНА, Баку, Азербайджан) с докладом о влиянии высоких и сверхвысоких давлений на распространение упругих волн в изотропных средах. В рамках различных вариантов теории малых и начальных деформаций с применением квадратичного и Мурнаганского типа упругих потенциалов автором получены аналитические зависимости параметров давления и скоростей распространения упругих волн от деформаций без дополнительной линеаризации относительно напряжения. Последнее позволяет синтезировать истинные величины упругих параметров деформированных сред из комплекса сейсморазведочных и сейсмологических данных.

Вопросы природы высокоэнергетических флюидных потоков (плюмов), которые согласно современным данным могут возникать в различных геосферах — от жидкого ядра и слоя  $D_2$  к верхней мантии, коромантийной смеси и волноводов земной коры, а также исследование энергетических и динамических процессов дегазации Земли были рассмотрены в двух содержательных докладах сотрудников Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины **В. П. Коболева** и **Т. А. Цветковой** с соавторами И. В. Бугаенко, Л. Н. Заец.

Большое внимание на секции было уделено проблемам современных прямопоисковых технологий при оценке перспектив нефтегазоносности в докладах **И. Н. Корчагина** с соавторами С. П. Левашов, А. И. Самсонов, Н. А. Якимчук, Д. Н. Божежа, Б. Х. Батырова (Институт прикладных проблем экологии, геофизики и геохимии и Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, LLP «Sky Quest Exploration», Алматы, Республика Казахстан).

В серии докладов сотрудников Карпатского отделения Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины (Львов) были отражены результаты различных электрометрических мониторинговых геодинамических исследований земной коры западной части Украины (**И. А. Чоботок**, В. Ю. Максимчук, Р. С. Кудепаевец, Е. Ф. Накалов) и решения задач инженерной геофизики (**О. Я. Сапужак**, О. И. Романюк, Б. Т. Ладановский, О. И. Пидвирный, В. В. Коляденко, С. А. Дещиця, Б. Я. Климович, О. В. Сыроежко).

Изучение напряженно-деформированного состояния кристаллических пород, обнаженных в верховье р. Рось, с последующими их петрологическими и изотопно-геохимическими исследованиями дает представление о деформации коры в западной части Украинского щита в раннем протерозое и имеет важное значение для построения геодинамической модели региона (доклад **С. В. Мычка** с соавторами С. И. Курило, В. Н. Бельским, А. В. Муровской, Институт геофизики им. С. И. Субботина и Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М. П. Семененка НАН Украины, Киев).

Большое внимание на секции «**Сейсмичность. Геофизические зондирующие системы**» (10 докладов) было уделено вопросам сейсмического мониторинга и сейсмогеодинамическим процессам в различных тектонических структурах Украины.

**С. Д. Каим** (Opole University of Technology, Poland) предложил механизм механохимического реактора, который работает в источнике землетрясения, и включает в себя цепочку физико-химических явлений, таких как эмиссия, имплозия, ударная диссоциация и ионизация, рекомбинация и взрыв.

Доклад **В. И. Романа** (соавторы А. В. Кендзера, В. С. Попков, М. В. Богаенко, З. М. Евстахевич, Д. Н. Гринь, Н. И. Мукоед, Институт геофизики им. С. И. Субботина, Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев) был посвящен разработке системы активного мониторинга сейсмических явлений планетарного мас-



штаба на базе технических средств энергосберегающего резонансного возбуждения и наблюдения сейсмических волн.

В выступлении **В. А. Корчина** (соавторы П. А. Буртный и Е. Е. Карнаухова, Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины) показано, что термобарические зоны с низкой сейсмической скоростью являются триггерным механизмом интенсивных релаксационных процессов в тектонических активных зонах земной коры.

Перспективы разработки системы сейсмического мониторинга в районах расположения важных энергетических объектов Украины были рассмотрены в докладе **И. Я. Сапужака** и С. Т. Вербицкого (Отдел сейсмичности Карпатского региона Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Львов).

На заключительном пленарном заседании участниками конференции отмечалось, что выполненные в последние годы научно-тематические обобщения

накопленной геолого-геофизической информации позволили создать новые и соответствующие современному мировому уровню знаний модели глубинного строения отдельных регионов в сочетании с изучением геологических явлений и процессов. Основой для таких кардинальных изменений послужили данные сейсмологической томографии, глубинного сейсмического зондирования, геоэлектрики и гравимагнитометрии. Существенно важную информацию привнесли данные дистанционного зондирования Земли и других мобильных методов, основанных на изучении естественных электромагнитных полей.

Коллективное обсуждение представленных на конференции докладов и критическая оценка достижений и недостатков в теоретическом обосновании и практической реализации работ позволят оптимизировать дальнейшие направления геофизических исследований на Украине.

## Украинский Геологический Комитет: 100 лет со времени создания, история реорганизаций, результаты работы

© В. И. Старостенко<sup>1</sup>, О. Б. Гинтов<sup>1</sup>, В. А. Ентин<sup>2</sup>, 2017

<sup>1</sup>Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>ГП «Украинская геологическая компания», Киев, Украина

Поступила 9 августа 2017 г.

**Введение.** Украинский Геологический Комитет, созданный в 1918 г., положил начало Геологической службе Украины (официальное название сегодня — Государственная служба геологии и недр Украины Министерства экологии и природных ресурсов Украины). К 90-летию создания службы, а конкретно Украинского Геологического Комитета, была опубликована статья [Гинтов и др., 2009], в которой кратко, но достаточно полно изложены как история создания Комитета и основные результаты его работы, так и история и результаты работы всех последующих структур, в которые он реорганизовывался.

В настоящей статье изложены некоторые дополнительные материалы о Комитете, а также приведена информация о деятельности Геологической службы Украины в последние десять лет.

Естественно, что имеются некоторые повторы по сравнению со статьей [Гинтов и др., 2009], но, во-первых, это неизбежно, поскольку речь идет об одном и том же предмете, и, во-вторых, эти повторы незначительны по объему.

В 1968 г. к 50-летию Украинский геологической службы в лице треста «Киевгеология», который формально в результате многих реорганизаций был порожден Украинским Геологическим Комитетом, Н. С. Расточинская подготовила подробный материал об истории создания и развития Службы. К сожалению, материал не был опубликован, но в ряде случаев мы им пользуемся [Расточинская, 1967]. В частности, из этого материала взята и в Приложении приведена таблица реорганизаций

геологических учреждений Украины, их названия, ведомственная принадлежность, время существования, фамилии руководителей и пр. Таблица охватывает интервал времени от ноября 1917 г. (Украинский Геологический Комитет еще не создан) и до 1979 г. (очевидно, что работа над таблицей продолжалась и после 1967 г.).

**Геологический Комитет.** К концу XIX в. в Российской империи был накоплен значительный объем экспериментального материала и его научного обобщения в области геологии и геофизики. Об этом свидетельствуют как отдельные статьи и обзоры [Старостенко, Исиченко, 2003; Гордин, 2004; Соловьев и др., 2014; Блох, 2016 и др.], так и крупные фундаментальные монографии [Мушкетовъ, 1899, 1903; Неймайръ, 1902, 1903; Голицынъ, 1912]<sup>1, 2</sup>. Все эти результаты потребовали создания органа, который способствовал бы организации и координации геологических исследований, содействовал ведомствам и частным компаниям в исследовании богатств страны. Для этого в 1882 г. в Санкт-Петербурге был создан Геологический Комитет [Геологический комитет, 1998, с. 265; Личков, 1919]. Одним из организаторов и директором Комитета с 1885 по 1903 г. был знаменитый геолог, первый выборный президент Российской АН (1917—1925)

<sup>1</sup> Во всех случаях при ссылках на цитируемые источники сохранена орфография оригинала (включая названия организаций).

<sup>2</sup> Первый учебник по расширенному курсу геофизики на русском языке П. Н. Тверского также в существенной мере опирается на работы, выполненные в XIX столетии в России [Тверской, 1930].

П. А. Карпинский [Карпинский..., 1998, с. 503]. Комитет выполнил огромную работу по изучению геологического строения недр России. Он полностью оправдал надежды, которые на него возлагались. И это было достигнуто при условии, что научные силы Комитета были весьма ограничены, а площадь исследований обширнейшая [Лічков, 1919].

После 1917 г. Комитет вошел в состав Всероссийского совета народного хозяйства (ВСНХ). В 1929—1930 гг. Комитет был реорганизован. На его базе в 1931 г. был создан Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт (ЦНИГРИ), который с 1939 г. стал Всероссийским геологическим институтом (ВСЕГЕИ) им. А. П. Карпинского [Геологический институт..., 1998, с. 265].

**О военно-политической обстановке в Киеве (Украине) с 1917 по 1920 г.** В указанное время военно-политическая обстановка в Киеве была чрезвычайно сложной, изменчивой, хаотичной и трагичной. Достаточно сказать, что за это время в Киеве было совершено 14 переворотов [Булгаков, 1995а, с. 41; Машкевич, 2010, с. 9], в том числе 30 и 31 августа 1919 г., т. е. за два дня было совершено два переворота [Машкевич, 2010]. Все это хорошо отражено не только в исторической [Машкевич, 2010] и мемуарной [Скоропадский, 2016], но и в художественной литературе [Булгаков, 1995б; Паустовский, 1958, с. 653—745]. Естественно, что это приводило к переписыванию истории [Машкевич, 2010, с. 132]. В результате пользоваться публикациями того времени, а также во многие последующие годы, сложно, поскольку в них много неясностей и противоречий. Более того, это даже привело к искажению украинского языка, в чем легко убедиться по приведенным в этом очерке ссылкам на работы того времени. Очень хорошо на эту тему написал К. Г. Паустовский «Петлюра привез с собой так называемый галицийский язык — довольно тяжелый и полный заимствований из соседних языков. И блестящий, действительно жемчужный, как зубы здоровых молодич, острый, поющий, народ-

ный язык Украины отступил перед новым пришельцем в далекие шевченковские хаты и тихие деревенские левады. Там он и прожил «тишком» все тяжелые годы, но сохранил свою поэтичность и не позволил сломать себе хребет» [Паустовский, 1958, с. 697]. П. П. Скоропадский в своих воспоминаниях затрагивает эту же языковую тему [Скоропадский, 2016, с. 16]<sup>3</sup>.

**О создании Украинского Геологического Комитета.** Несмотря на значительные успехи работы Геологического Комитета, созданного в Санкт-Петербурге, было два обстоятельства, которые ограничивали возможности его деятельности. Во-первых, он территориально был расположен на границе государства, т. е. на его окраине, во-вторых, штат был малочисленным и сосредоточен в одном месте [Лічков, 1919]. В силу этого, а также из-за четкой централизации работ Комитета, среди ведущих геологов страны начало созревать мнение о необходимости создания автономных отделов на местах, работы которых координировались бы общими планами и целями.

Геологи Украины, например, давно думали о создании в Киеве отдела Геологического Комитета [Лічков, 1919]. Итог огромной подготовительной организационной работы в этом направлении подвел в конце 1917 г. В. И. Лучицкий, подготовив докладную записку «К вопросу о создании Украинского Геологического Комитета в Киеве». В этом документе обосновывалась необходимость создания на Украине государственного геологического учреждения для изучения ее территории. Записка была обсуждена и одобрена на собрании геологов. По пунктам был обсужден и одобрен также Устав Комитета, в основу которого положен Устав Петроградского (Санкт-Петербургского) Геологического Комитета. После этого В. И. Лучицкий начал переговоры с Министерством Торговли и Промышленности о создании Комитета при этом Министерстве [Лічков, 1919]. Удивительно, но сложнейшая военно-

<sup>3</sup> О жизни и деятельности П. П. Скоропадского недавно появилась краткая, но очень информативная публикация [Сборщиков, 2017].

политическая обстановка в Киеве, о чем говорилось выше, не помешала решениям названного Министерства создать Украинский Геологический Комитет с 1 февраля 1918 г. Директором Комитета был утвержден В. И. Лучицкий.

В связи с датой 1 февраля 1918 г. остаются не совсем ясными два вопроса. Первый — 1 февраля по какому стилю? В России григорианский календарь был введен 14 февраля 1918 г. [Календарь, 1998, с. 480], т. е. по старому стилю — 1 февраля 1918 г. Отсюда можно предположить, что в Киеве в этот день вряд ли было дело до нового стиля исчисления времени и, следовательно, по новому стилю Украинский Геологический Комитет создан 14 февраля 1918 г. Второй вопрос — кому в этот день в Киеве принадлежала власть? До 9 февраля 1918 г. она принадлежала Украинской Народной Республике, которая 20 ноября 1917 г. была провозглашена III Универсалом, принятым Украинской Центральной Радой, возглавляемой М. С. Грушевским. Но 9 февраля 1918 г. власть принадлежала уже большевикам [Машкевич, 2010, с. 11], т. е. формально Комитет создан при большевиках. Эти два вопроса никоим образом не затрагиваются в хорошем очерке Б. Л. Личкова об истории создания Украинского Геологического Комитета [Личков, 1919].

В таких драматических условиях работали геологи-профессионалы!

Летом 1918 г. под руководством В. И. Вернадского начал работать Комитет по созданию Украинской академии наук [Личков, 1919; Лукин, 2015]. Академия была создана в ноябре 1918 г. и гетманом П. П. Скоропадским в числе первых ее академиков были назначены В. И. Вернадский и П. А. Тутковский [Палій, Храмов, 2013, с. 344]. Они входили также в состав Совета Украинского Геологического Комитета [Справоздания..., 1919]. Поскольку создавалась Академия наук, среди геологов возникла идея передать Комитет в состав Физико-Математического отделения Академии.

Естественно, В. И. Вернадский и П. А. Тутковский активно поддерживали такую идею. Но она не была реализова-

на из-за несогласия на это Министерства Торговли и Промышленности [Личков, 1919, с. 7—8]. Однако взаимное влияние и связи В. И. Вернадского, первого Президента Украинской академии наук [Палій, Храмов, 2013, с. 342], и П. А. Тутковского, первого директора Института геологических наук НАН Украины<sup>4</sup> [Институт..., 2012, с. 1; Гожик та ін., 2016], с Украинским Геологическим Комитетом были постоянными и плодотворными, хотя, в основном, неформальными.

**О работе Украинского Геологического Комитета.** Деятельность Комитета в 1918 г. была исключительно кабинетной. Полевые работы были невозможны из-за военно-политической ситуации в стране, а также из-за отсутствия средств. Комитет принял решение собрать и систематизировать имеющиеся материалы. Было решено построить для территории Украины геологическую карту в 25-верстном масштабе, карту полезных ископаемых в 10-верстном масштабе и в том же масштабе карту строительных материалов. Комитет сотрудничал с Министерствами Земельных дел, Дорог, Народного здоровья, Внутренних дел. Принимал участие в упорядочении работы и сохранении Гидрогеологического Отдела Министерства Земельных дел. С этим Отделом Комитет находился в тесном контакте и координировал его деятельность.

Комитет также занялся систематизацией геологической литературы по Украине и составлением ее Каталога [Справоздания..., 1919].

В 1920 г. положение Комитета стало постоянно принимать форму учреждения республиканского значения, начались согласовываться работы Комитета с Геологическим Комитетом в Ленинграде. Что касается полевых работ, то они были проведены на бурый уголь.

1921 г. знаменателен тем, что был утвержден бюджет в объеме, позволяющем летом провести полевые работы. В целом же положение с финансированием было чрезвычайно сложным. Судить об этом,

<sup>4</sup> Приводится сегодняшнее название.

например, легко по такому факту: зимой из-за отсутствия дров и денег температура в помещениях Комитета была 3—4° С.

В 1922 г. Украинский Геологический Комитет реорганизован в Украинское Отделение Геологического Комитета (УОГК), которым до 1929 г. последовательно руководили В. И. Лучицкий, Б. Л. Личков, В. В. Резниченко, А. В. Гогунцев. Финансовое положение до 1925 г. оставалось сложным и полевые работы проводились в очень небольших объемах.

Начиная с 1925—1926 гг. положение Комитета укрепляется: интенсифицируется его научная работа, совершенствуется структура.

В 1926—1927 гг. установлены тесные связи с Геологическим институтом и Геологическим кабинетом Украинской АН.

В целом за десятилетие (1918—1928) много было сделано, несмотря на неблагоприятные условия для работы [Десять..., 1928]. Перечислим некоторые из результатов: изучены кристаллические породы вдоль железной дороги Бобринская—Голта и террасы Днестра, получены новые данные о Каневских дислокациях, исследованы рапакиви в окрестностях Малина, изучена связь между высотой залегания кристаллических пород и современным рельефом в районе Умань—Звенигородка, исследована современная трансгрессия Черного моря, изучены эффузивные породы Волыни и зона разлома в северо-западной части Украинской кристаллической полосы, собраны материалы о геологии Киева [Вісник..., 1928].

Десятилетний юбилей Украинского Отделения Геологического Комитета торжественно отмечался в Киеве 12 марта 1928 г. В торжествах приняло участие много почетных гостей. Торжественное заседание открыл директор Комитета В. В. Резниченко. По его предложению был избран президиум заседания во главе с почетным председателем, которым стал директор Всесоюзного Геологического Комитета проф. Д. И. Мушкетов. Было много выступлений и приветствий [Десятилітній..., 1929]. В. Н. Чирвинский сделал доклад «О

научных достижениях Украинского Отделения Геологического Комитета в области региональной геологии за 10 лет его существования» [Вісник..., 1929, в. 12, с. 21—29]. В этом же выпуске опубликованы еще две важные статьи, свидетельствующие о значительных результатах работы Комитета. Это — статья Н. И. Безбородько «Українська Кристалічна Смуга та корисні копалини України» и статья А. Е. Зеленко «Про досягнення Українського Відділу Геологічного Комітету в галузі застосованої геології за 10 років його існування».

В соответствии с постановлением Президиума ВСНХ СССР от 27 июля 1929 г. «Геологический Комитет научно-технического управления» реорганизован в «Главное Геолого-Разведочное Управление при Президиуме ВСНХ СССР». В связи с этим и «Украинское Отделение Геологического Комитета» реорганизовано в «Украинское Районное Геолого-Разведочное Управление». Соответствующим образом меняется и название «Вісника» [Вісник..., 1929, в. 14]. В [Вісник..., 1930] приведен подробный список всех изданий Комитета. Сборник одновременно является хорошим справочником всего того, что сделано Комитетом за время его существования.

В 1931 г. был издан последний выпуск «Вісника» [Вісник ..., 1931]. В нем опубликованы статьи о колебательных движениях земной коры среднего Приднепровья и истории Днепровской долины, геологии и геоморфологии Полесья, об артезианских водах в Бобре Хабенского района, пегматитовых жилах в окрестности Малина, о запасах подмеловых артезианских вод, питающих Киевский коммунальный водопровод и новом выходе норита в северной части Украинской кристаллической плиты, о работах на бурый уголь, о кремнисто-железистых породах низовьев р. Каменки. Здесь же была опубликована одна из первых геофизических разведочных работ: А. Строна «Криворожско-Кременчугская магнитная аномалия и некоторые данные для тектоники приднепровской кристаллической полосы на основании магнитометрических съ'емок».

В последующие десять лет было также предпринято немало реорганизационных преобразований. Из них выделим следующие: в 1931 г. Украинское районное геологоразведочное управление переименовано в Украинский геологоразведочный трест, который в итоге последующих реорганизаций в 1941 г. превращен в Украинское геологическое управление, подчиненное Комитету в делах геологии при Совете Народных Комиссаров СССР [Гинтов и др., 2009; Расточинская, 1967]. В этот период здесь начали работать известные со временем ученые — геологи Н. И. Безбородько, В. Г. Бондарчук, Н. Е. Тахтаров, Ю. Г. Дубяга, М. Н. Ключников, В. Т. Сябряй, А. М. Безутлый, М. И. Ожегова, И. Е. Слензак, К. И. Маков, геофизики С. И. Субботин, В. Б. Соллогуб и др. Некоторые из них стали учителями авторов данной статьи.

Во время Великой Отечественной войны с июля 1941 г. по февраль 1944 г. Украинское геологическое управление находилось в эвакуации в Западном Казахстане в Актюбинске. За это время украинские геологи открыли и разведали многие месторождения полезных ископаемых (бокситов, марганца, угля, меди, железной руды, гипса и пр.) [Гинтов и др., 2009].

22 июля 1957 г. — новая реорганизация: создается Главное управление геологии и охраны недр при Совете Министров УССР (Главгеология УССР).

В августе 1958 г. в рамках Главгеологии УССР создается и начинает работать трест «Киевгеология». Он ориентирован на поиски и разведку твердых полезных ископаемых. Ему, в частности, в 1966 г. из треста «Укргеофизразведка» (начало которому было положено в 1951 г. созданием треста «Укрнефтегеофизика») переданы все геофизические работы этого направления [Гинтов и др., 2009; Толкунов, 2002]. Их высокая геологическая результативность хорошо известна и довольно полно отображена в публикациях [Гинтов и др., 2009; Ентин, 2017], а также в материалах [Расточинская, 1967]. Следует подчеркнуть, что помимо чисто производственной деятельности в «Киевгеологии» велись (совмест-

но с иными организациями) активные научно-методические разработки, позволявшие проводить геофизические работы на значительно более высоком технологическом уровне. Была, например, создана автоматизированная система оперативной обработки данных гравиметрии и магнитометрии и пр. [Старостенко и др., 1972; Старостенко, 2009].

В 1979 г. трест «Киевгеология» реорганизован в Северо-Украинское производственное геологическое объединение «Севукргеология», которое в 1998 г. в свою очередь реорганизовано в Государственное региональное геологическое предприятие «Севгеология» [Гинтов и др., 2009].

Со 2 февраля 2012 г. на базе «Севгеологии» путем изъятия части его имущества, прав и обязанностей было образовано Государственное предприятие «Украинская геологическая компания», в которой сохраняются документы объединенного архива.

После 1991 г. геологическая отрасль Украины вначале по-прежнему вела активную работу на поиски полезных ископаемых, включая новые, нетрадиционные для Украины виды (золото, самородная медь, алмазы, графит, фосфаты и др.) [Гинтов и др., 2009]. Но с годами деятельность отрасли стала быстро угасать и в настоящее время государственная геологическая служба Украины почти полностью развалена. Очень трудно работать и частным компаниям. И это при условии, что минерально-сырьевой комплекс — это важнейшая экономическая база страны, а запасы полезных ископаемых далеко не исчерпаны. Об этом много писали и говорили в последнее время [Лукин, 2014; Лукин, 2014; Старостенко, 2015а, 2016; Попадюк, Хрящевская, 2016; Ентин, 2017]<sup>5</sup>. В юбилейной статье не следует на этом

<sup>5</sup> В работе [Старостенко, 2015а] неверно указана дата образования Украинского Геологического Комитета — 12 марта 1918 г. Это — результат ошибочно понятых двух фраз: «12 березня року 1928, Укргеолком святкував 10-тилітній ювілей свого існування. З нагоди цього відбулось того дня врочисте засідання ...» [Десятилітній ..., 1929, с. 5].

подробно останавлюватися. Это предмет самостоятельного глубокого анализа и обсуждения. Отметим только, что в НАН Украины геолого-геофизические исследования и полевые работы, несмотря на проблемы с финансированием, проводятся достаточно активно [Старостенко, Гинтов, 2013; Лукин, 2014; Лукін, 2014; Старостенко, 2015а,б, 2016, 2017; Старостенко, Русаков, 2015; Старостенко та ін., 2016].

В заключение, отмечая 100-летие со времени создания Украинского Геологического Комитета, выражаем надежду, что в ближайшее время ситуация начнет меняться к лучшему и государственная геологическая отрасль на Украине в конце-концов сможет достичь того уровня активной работы и результативности, которые были при Министре геологии УССР Петре Федоровиче Шпаке [Шаталов, 2016а,б].

### Список литературы

- Блох Ю. И. Драматичные истоки российской магниторазведки. Ч. I. *Рос. геофиз. журн.* 2016. № 55—56. С. 109—129.
- Булгаков М. Киев-город. В кн.: *Белая гвардия. Киев-город*. Киев: Богдана, 1995а. С. 40—50.
- Булгаков М. Белая гвардия. В кн.: *Белая гвардия. Киев-город*. Киев: Богдана, 1995б. С. 69—322.
- Вісник Українського Відділу Геологічного Комітету*. 1928. Вип. 11. 222 с.
- Вісник Українського Відділу Геологічного Комітету*. 1929. Вип. 12. 59 с.
- Вісник Української Районової Геолого-Розвідкової Управи*. 1929. Вип. 14. 200 с.
- Вісник Української Районової Геолого-Розвідкової Управи*. 1930. Вип. 15. 182 с.
- Вісник Української Районової Геолого-Розвідкової Управи*. 1931. Вип. 16. 139 с.
- Геологический институт*. В кн.: *Большой энциклопедический словарь*. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 265.
- Геологический комитет*. В кн.: *Большой энциклопедический словарь*. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 265.
- Гинтов О. Б., Буковский В. Ф., Приходько В. Л., Шимкив Л. М. Укргеолком (1918) — «Північгеологія» («Севгеология»). Историческая справка. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 2. С. 163—168.
- Гожик П. Ф., Макаренко Д. Е., Маслун Н. В., Ключина Г. В. Павло Аполлонович Тутковський — засновник і перший директор Інституту геологічних наук НАН України, фундатор мікропалеонтологічної школи. *Геолог. журн.* 2016. № 2. С. 7—16.
- Голицынъ Б. Лекции по сейсмометрии. С.-Петербург: Типография Императорской Академии наукъ, 1912. 654 с.
- Гордун В. М. Очерки по истории геомагнитных измерений. Москва: Ин-т физики Земли РАН, 2004. 162 с.
- Десятилітній ювілей Українського Відділу Геологічного Комітету. Вісник Українського Відділу Геологічного Комітету*. 1929. Вип. 12. С. 5—20.
- Десять років праці Українського Геологічного Комітету. Вісник Українського Відділу Геологічного Комітету*. 1928. Вип. 11. С. 5—20.
- Ентин В. А. 60 лет в строю: к геофизической стороне одной биографии и не только. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 6. С. 162—200.
- Інститут геологічних наук Національної академії наук України, 1926—2012*. Київ: Вид. ІГН НАН України, 2012. 40 с.
- Календарь*. В кн.: *Большой энциклопедический словарь*. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 480.
- Карпинский А. П. В кн.: *Большой энциклопедический словарь*. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 503.
- Лічков Б. А. Історія утворення Українського Геологічного Комітету. *Вісник Українського Геологічного Комітету*. 1919. Вип. 1. С. 1—8.
- Лукин А. Е. Владимир Иванович Вернадский: жизнь, судьба, свершения. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 95—134.
- Лукин А. Е. Углеродородный потенциал больших глубин и перспективы его освоения в Украине. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 3—23.

- Лукин О. Ю. Забезпечення України власним природним газом: проблемні аспекти. *Вісник НАН України*. 2014. № 9. С. 16—22.
- Машкевич С. Два дня из истории Киева. Киев: ВАРТО, 2010. 160 с.
- Мушкетовъ И. В. Физическая геология. Т. I. С.-Петербургъ: Типографія Ю. Н. Эрлихъ, 1899. 784 с.
- Мушкетовъ И. В. Физическая геология. Т. II. С.-Петербургъ: Типографія Ю. Н. Эрлихъ, 1903. 360 с.
- Неймайръ М. Исторія Земли. Т. I. С.-Петербургъ: Типографія товарищества «Просвѣщеніе», 1903. 761 с.
- Неймайръ М. Исторія Земли. Т. II. С.-Петербургъ: Книгоиздательское Товарищество «Просвѣщеніе», 1902. 848 с.
- Палій В. М., Храмов Ю. О. Національна Академія Наук України. 1918—2013. Персональний склад. Київ: Фенікс, 2013. 440 с.
- Паустовский К. Повесть о жизни. Собрание сочинений в шести томах. Т. 3. Москва: Гос. изд. художественной литературы, 1958. 792 с.
- Попадюк И. В., Хрящевская О. И. Беседа с С. Н. Стовбой в связи с 60-летием. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 6. С. 198—201.
- Расточинская Н. С. Материалы к составлению исторического обзора деятельности треста «Киевгеология». Киев, 1967. 158 с. (рукопись, не опубликовано).
- Сборщиков Н. Последний гетман: друг Германии, русский монархист и украинский патриот. *КП в Украине*. 15.5. 2017. С. 10.
- Скоронагский П. Воспоминания. Конец 1917 года по декабрь 1918 года. В кн.: *Скоронагский П. Спогади. Кінець 1917 — грудень 1918*. Київ: Наш формат, 2016. С. 11—339.
- Соловьев В. О., Кривуля С. В., Фык И. М., Донской Д. Ф., Варавина Е. П., Москаленко И. А. История развития научных направлений геологии. Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. 152 с.
- Справоздання Українського Геологічного Комітету за 1918 рік. *Вісник Українського Геологічного Комітету*. 1919. Вип. 1. С. IV—VIII.
- Старостенко В. И. К 100-летию со дня рождения Георгия Сергеевича Бутакова — геофизика, патриота, дворянина. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 3. С. 139—145.
- Старостенко В. И. Опыт юбилейного самообслуживания продолжается: десять лет спустя. *Геофиз. журн.* 2015а. Т. 37. № 2. С. 146—170.
- Старостенко В. И., Бас Р. Г., Бутаков Г. С., Дядюра В. А. Автоматизированная система оперативной обработки данных гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наук. думка, 1972. 164 с.
- Старостенко В. И., Исиченко Е. П. Малоизвестные страницы истории формирования и развития геофизических исследований на Украине. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 5. С. 3—30.
- Старостенко В. И., Русаков О. М. (ред.). Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Галактика, 2015. 212 с.
- Старостенко В. И. Геофизика: результаты фундаментальных та прикладних досліджень. *Вісник НАН України*. 2015б. № 5. С. 32—34.
- Старостенко В. И. Про виконання наукового проекту «Геофізичні дослідження літосфери центрального та північного регіонів України для оцінки перспектив нафтогазоносності (GEORIFT)». *Вісник НАН України*. 2017. № 3. С. 17—23.
- Старостенко В. И. Про виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Стратегічні мінеральні ресурси України». *Вісник НАН України*. 2016. № 2. С. 29—32.
- Старостенко В. И., Гинтов О. Б. (ред.) Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения полезных ископаемых. Киев: Прастыи луды, 2013. 500 с.
- Старостенко В. И., Гинтов О. Б., Кутас Р. И. Геофізичні дослідження для підвищення ефективності пошуку корисних копалин в Україні. *Вісник НАН України*. 2016. № 3. С. 54—61.



Тверской П. Н. Курс геофизики. Москва-Ленинград: Государственное изд-во, 1930. 568 с.

Толкунов А. П. Государственному геофизическому предприятию «Укргеофизика» — 50 лет. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 3. С. 120—129.

Шаталов Н. Н. Петр Федорович Шпак — выдающийся министр, ученый, человек. *Геолог. журн.* 2016а. № 2. С. 133—136.

Шаталов Н. Н. Петр Федорович Шпак — выдающийся министр и ученый эпохи расцвета геологии в Украине. *Мінеральні ресурси України.* 2016б. № 3. С. IV—VII.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Краткая историческая хроника создания геологоразведочного треста «Киевгеология»  
(Геологической службы Украины), 1917—1979 гг.

Даты возникновения и названия организаций (с 1917 по 1979 годы), их местонахождение, ведущее направление	Ведомство, в подчинении которого находится(лась) данная организация (республиканское, союзное)	Руководящий состав организации: фамилия, имя, отчество	Дополнительная информация
1914—1917 годы. Гидрогеологическое отделение Управления гидротехнических работ армий юго- западного фронта «Гидроюз» — военная гидрогео- логическая организация в Киеве, обслуживающая нужды фронта и тыла		Лучицкий В.И., Палий Р. Н., Френд М.В., Цирвинский В.Н., Дубянский В.В. и др.	
1917 г., сентябрь. Начал свою деятельность Отдел сырья при Киевском комитете военно-тех- нической помощи в Киеве Цель — обслуживание нужд фронта	Киевский комитет военно- технической помощи	Президиум:  Лучицкий В.И.  Редколлегия по составлению геологических карт: Лучицкий В.И. Короневич П.М. Личков Б.Л. Цирвинский В.Н. Дилевская А.М. Красовский А.В. Крыжановский А.А. Мокринский В.В. Палий Р.Н. Смирнов В.П. Армашевский П.Я. Ласкарев В.Д. Тутковский П.А.	Председатель президиума, проф. Киевского университета    Редактор Помощник редактора —«— —«— Геолог-картосоставитель Геолог-картосоставитель —«— —«— Геолог-картосоставитель —«— —«— —«—

<p>1917 г., ноябрь. Заседание Отдела сырья, на котором ставится вопрос о ликвидации Отдела сырья и замене его Украинским геологическим комитетом, который необходимо создать для проведения геологических исследований в Украине. Предложение (высказано В.И. Лучицким) было принято единогласно.</p>			
<p>В.И. Лучицким составлена докладная записка «К вопросу о создании Украинского геологического комитета в Киеве», которая была заслушана и одобрена на собрании геологов. На ряде последующих заседаний был принят проект устава Комитета</p>			
<p>1918 г., 01 февраля. Официальное оформление и начало деятельности Украинского геологического комитета (УГК), созданного при Министерстве торговли и промышленности (Киев)</p>	<p>Министерство торговли и промышленности Украины Совета Народно Хозяйства</p>	<p>Лучицкий В.И. Личков Б.А. Мокринский В.В. Буренин Г.С. Резниченко В.В.</p>	<p>Директор УГК (утвержден Министром торговли и промышленности с 01 февраля 1918 г.) геолог —«— Внештатный геолог —«—</p>
<p>1922 г., 24 января. Первый визит представителя УГК Б.А. Личкова в Петроград (Российский геологический комитет) с целью установления связи. Постановление Российского геологического комитета: представленный проект, устанавливающий положение Укр. геол. ком., одобрить и содействовать проведению проекта в жизнь</p>	<p>Российский геологический комитет при ВСНХ СССР</p>		
<p>1922 г., 22 марта. Заседание Российского геологического комитета: обсуждение «Положения об Украинском геологическом комитете» (докладчик В.И. Лучицкий). Положение об УГК, как отделении Российского Геолокома — Украинское отделение ГК (УОГК), было утверждено</p>	<p>Российский геологический комитет при ВСНХ СССР</p>		

1923 г. Положение об Украинском отделении ГК было подписано директором Российского ГК Н.Н. Яковлевым и отправлено в Киев вместе со штатным расписанием	Российский геологический комитет при ВСНХ СССР	Лучицкий В.И.	Директор УОГК
1923 г., 1 мая. Существовавшие на Украине Юго-западное управление промышленных разведок (Киев) и Украинское областное управление разведок (Харьков), подчинявшиеся Центральному управлению промышленных разведок (Москва), слились в одно целое с Украинским отделением геологического комитета, образовав Отдел прикладной геологии УОГК	Российский геологический комитет при ВСНХ СССР	Личков Б.Л. Коклик С.Г. Резниченко В.В. Буренин Г.С. Чирвинский В.Н. Мокринский В.В. Лучицкий В.И.	Директор УОГК
1924—1925 годы. Проект Президиума Госплана УССР о преобразовании УОГК в самостоятельный УГК. ВСНХ СССР отклонило этот проект	Российский геологический комитет при ВСНХ СССР	Личков Б.Л. Коклик С.Г. Резниченко В.В. Буренин Г.С. Чирвинский В.Н. Мокринский В.В. Лучицкий В.И.	Директор УОГК
1928 г., 12 марта. УОГК отмечает свой десятилетний юбилей	Геолком СССР при ВСНХ СССР	Резниченко В.В. Чирвинский В.Н. Зеленко А.Е. Буренин Г.С. Дубяга Ю.Г. Палий Р.Н.	Директор УОГК геолог —«— —«— —«— —«—
1929 г., 23 октября. Украинское отделение геологического комитета ВСНХ СССР реорганизовано в Украинское районное геологоразведочное управление (УРГРУ)	Геолком СССР реорганизован в Главное геологическое разведочное управление при ВСНХ СССР	Гогунцев А.В. Мельников Д.Ф. Крокос В.И. Чирвинский В.Н. Резниченко В.В. Ожегова М.И. Евсеева С.И. Бондарчук В.Г. Безбородько Н.И.	Директор УОГК Директор УРГРУ (с 20.08.1929 г.) Пом. директора по научной части Зав. отд. геол. карты Ст. геолог Научный работник —«— Зав. музеем Зав. петрогр. кабинетом

1931 г., 2 сентября. Украинское районное геологоразведочное управление переименовано в Украинский геологоразведочный трест (УГРТ)	Главное геологоразведочное управление ВСНХ СССР переименовано во Всесоюзное геологоразведочное объединение «Союзгеоларазведка» Главгеологии Наркомтяжпрома СССР	Мельников Д.Ф.	Начальник УРГРУ (заем УГРТ) Зам. по науч. части Пом. по науч. части Ст. геолог по уголю Ст. геолог —«— —«—
		Мазуренко	
		Зеленко А.Е.	
		Чирвинский В.Н.	
		Дубяга Ю.Г.	
		Тахтаров Н.Е.	
		Милай А.И.	
		Фаст Б.М.	
		Розов Л.Д.	
		Савенко П.И.	
1933 г., 12 декабря. Украинский геологоразведочный трест реорганизован в Украинский геолого-гидрогеодезический трест (УГГТ)	Союзгеоларазведка Главгеологии Наркомтяжпрома СССР и Главное геодезическое управление объединены в Главное геолого-гидрогеодезическое управление Наркомтяжпрома СССР	Безбородько Н.И.	Управляющий УГГТ Зам. по тех. части Ст. геолог —«— —«— —«— —«— —«— —«— —«— Управляющий (1934 г.) Гл. инженер (1934 г.)
		Галака О.И.	
		Клюшников М.Н.	
		Чирвинский В.Н.	
		Бабиенко Д.В.	
		Крокос В.И.	
		Колисниченко	
		Высоцкий В.И.	
		Орлов В.П.	
		Высоцкий В.И.	
1935 г., 10 августа. Украинский геолого-гидрогеодезический трест переименован в Украинский геологический трест (УГТ) Главного геологического управления Наркомтяжпрома СССР	Главное геогидрогеологическое управление Наркомтяжпрома СССР	Родионов С.П.	Управляющий УГТ Гл. инженер Зам. гл. инженера Ст. геолог —«— Ст. гидрогеолог —«— Зав. бюро подзем. вод Ст. геолог —«— —«— —«— Управляющий УГТ в 1936—1937 гг.
		Некипелов	
		Клюшников М.Н.	
		Палий Р.Н.	
		Дранников А.М.	
		Личкова Е.А.	
		Чирвинский В.Н.	
		Савенко П.И.	
		Сябряй В.Т.	
		Левитский В.С.	
Кудрявцев И.Н.			

<p>1938 г., 28 июля. Украинский геологический трест переименован в Геологическое управление УССР (ГУ УССР)</p>	<p>С 05.03.1938 г. Главное геологическое управление Наркомтяжпрома СССР, с 28.07.1939 г. — Комитет по делам геологии при СНК СССР</p>	Кандыба В.А.	<p>Управ. ГУ УССР Гл. инженер ГУ Ст. геолог Начальник НИСа Ст. инженер геоконтроля Начальник отд. геолфонда Ст. инженер Ст. инженер по геофиз. работам Зав. топогеодез. отд. Ст. гидрогеолог Ст. геолог Начальник ГУ (с 1939 г.) Гл. инженер ГУ (с 1939 г.) Начальник НИСа (с 1939 г.)</p>	
		Золозов Ф.С.		
		Куделя А.А.		
		Брянский П.И.		
		Сябряй В.Т.		
		Сенатор С.Т.		
		Безуглый А.М.		
		Завистковский		
		Осадчий Д.А.		
		Аранников А.М.		
		Ожегова М.И.		
		Володин Г.С.		
		Слензак И.Е.		
		Маков К.И.		
		Володин Г.С.		<p>Начальник УГУ Гл. инженер УГУ Начальник производственного отдела Начальник НИСа Начальник геоконтроля Начальник геолфонда Ст. инженер ТКЗ Ст. инженер —«— Начальник топоотдела</p>
Слензак И.Е.				
Брянский П.И.				
Маков К.И.				
Нацик П.Т.				
Сенатор С.Т.				
Сбрий В.Т.				
Финкельштейн М.М.				
Зубов А.И.				
Осадчий Д.А.				
Володин Г.С.	<p>Начальник УГУ</p>			
Володин Г.С.				
Володин Г.С.				
Кузьменко В.И.				
Брянский П.И.				
Зубов А.И.				
Финкельштейн М.М.				
Сайдаковский С.З.				
Осадчий Д.А.				
Гидман И.А.				
Севастьянов				
<p>1941 г., 12 июля. Геологическое управление УССР переименовано в Украинское геологическое управление (УГУ)</p>		<p>Комитет по делам геологии при СНК СССР</p>	Володин Г.С.	<p>Начальник УГУ</p>
			Володин Г.С.	
			Володин Г.С.	
<p>1941 г., 12 июля. УГУ выезжает из Киева (эвакуируется на восток)</p>		<p>Комитет по делам геологии СНК СССР</p>	Володин Г.С.	<p>Начальник УГУ</p>
	Кузьменко В.И.			
	Брянский П.И.			
<p>1941 г., 20 июля. УГУ прибыло в Барвенково</p>	<p>Комитет по делам геологии СНК СССР</p>	Володин Г.С.	<p>Начальник УГУ Гл. инженер, и.о. нач. производ. отдела Ст. инженер —«— —«— Ст. инженер-гидрогеолог Ст. инженер по топороботам Ст. инженер экон. отдела Ст. инженер тех. отдела</p>	
		Кузьменко В.И.		
		Брянский П.И.		

1941 г., 20 сентября. УГУ прибыло в Старобельск	Комитет по делам геологии СНК СССР	Те же	—«—
1942 г., февраль. УГУ возобновляет свою деятельность, эвакуировавшись в Западный Казахстан, Актюбинск	Комитет по делам геологии при СНК СССР	Те же	—«—
1943 г. Продолжение работ УГУ в Западном Казахстане (база в Актюбинске)	Комитет по делам геологии при СНК СССР	Борковский П.М.	Начальник УГУ Гл. инженер УГУ Начальник производственного отдела Начальник геолофонда Начальник топоотдела Начальник планового отдела Гл. бухгалтер Ст. инженер по горно-буровым работам
		Кузьменко В.И.	
		Финкельштейн М.М.	
		Сенатор С.Т.	
		Осадчий Д.А.	
		Родштейн А.Б.	
		Князьков А.Я.	
		Севастьянов	
1943 г., ноябрь. Создание из числа работников УГУ спецкомиссии для восстановления геологической службы в Украине и возобновления деятельности УГУ в Киеве. 01 декабря 1943 г. комиссия прибыла в Киев	Комитет по делам геологии при СНК СССР	Грызан Н.И.	Председатель комиссии, представитель Геолокома Зам. председателя комиссии Член комиссии —«— —«— —«—
		Кузьменко В.И.	
		Басс Ю.Б.	
		Басс А.М.	
		Назаренко Д.П.	
		Рогозовский С.Н.	
		Кузьменко В.И.	
1944 г., январь. Резервация работников УГУ в Киев и возобновление его деятельности. На базе Укргеоуправления в Актюбинске было создано Запдно-Казахское геологическое управление	Комитет по делам геологии при СНК СССР	Кузьменко В.И.	Начальник УГУ Гл. геолог УГУ (с 09.10.1944 г. — гл. инженер УГУ) Зам. начальника УГУ Гл. геолог УГУ (с 09.10.1944 г.) Ст. инженер —«—
		Финкельштейн М.М.	
		Заруденко М.Н.	
		Родионов С.П.	
		Слензак И.Е.	
		Басс Ю.Б. и др.	
		Кузьменко В.И.	
1946 г., 15 марта. Украинское геологическое управление переименовано в Украинское государственное геологическое управление УССР (УГГУ)	Комитет по делам геологии при Совете Министров СССР. С 13 июня 1946 г. — Главное управление по поискам и геологической съемке в западных районах СССР Министрства геологии СССР	Финкельштейн М.М.	Начальник УГГУ Гл. инженер УГГУ Гл. геолог УГГУ Зам. начальника УГГУ Ст. инженер производственного отдела Ст. инженер
		Жуков М.М.	
		Заруденко М.Н.	
		Высочанский П.М.	
		Доброхотов М.Н. и др.	

1948 г., 8 ноября. Украинское государственное геологическое управление переименовано в Украинское геологическое управление (УГУ)	<p>Главное управление по поискам и разведке металлов «Главметаллгеология» Министерства геологии СССР</p>	<p>М.А. Котиков</p>	<p>Начальник УГУ Гл. инженер УГУ Гл. геолог УГУ Зам. начальника УГУ Ст. инженер —«— —«— —«— —«—</p>
		<p>Ершов В.А. Жуков М.М. Заруденко М.Н. Машкара И.И. Доброхотов М.Н. Финкельштейн М.М. Басс Ю.Б. Нечаев В.А. Ожегова М.И. и др.</p>	
1949 г. В состав УГУ вливается расформированный трест «Укрутлегеология»	<p>Главное управление по поискам и разведкам в западных районах «Главзападгеология» Министерства геологии СССР</p>	<p>Котиков М.А. Трофимов С.Ф. Ершов В.А. Заруденко М.Н. Артеменко В.И. Брянский П.И. Костюченко И.В. Щеглов А.С. Литвиненко И.С. Машкара И.И. Стукало А.П. Кареньгин Ф.И. Московченко А.М.</p>	<p>Зав. петрогр. кабинетом Начальник УГУ Гл. инженер УГУ Гл. геолог УГУ Зам. начальника УГУ Гл. механик УГУ Начальник производственного отдела Зам. начальника УГУ по хоз. части (1950 г.) Зам. начальника УГУ по политчасти (1950 г.) Начальник производственно-геологического отдела УГУ (1951 г.) Гл. инженер УГУ (в 1952 г.) Начальник геологического отдела УГУ (1952 г.) Зам. начальника по политчасти УГУ (1952 г.) Зам. начальника УГУ по админ. хоз. части Начальник УГУ Гл. инженер УГУ Гл. геолог УГУ Зам. начальника УГУ Нач. геологического отдела УГУ</p>
		<p>Котиков М.А. Машкара И.И. Ершов В.А. Московченко А.М. Стукало А.П.</p>	
1953 г. Украинское геологическое управление	<p>С 30 апреля Министерство металлургической промышленности СССР, с 31 августа — Министерство геологии и охраны недр СССР</p>	<p>Котиков М.А. Машкара И.И. Ершов В.А. Московченко А.М. Стукало А.П.</p>	<p>Начальник УГУ Гл. инженер УГУ Гл. геолог УГУ Зам. начальника УГУ Нач. геологического отдела УГУ</p>



<p>1957 г., 22 июля. Украинское геологическое управление переименовано в Киевское геологическое управление Главгеологии УССР (КГУ)</p>	<p>22 июля организовано Главное управление геологии и охраны недр при Совете Министров Украинской ССР (Главгеология УССР) Министерства геологии и охраны недр СССР</p>	<p>Котиков М.А.</p>	<p>Начальник КГУ Гл. инженер КГУ Гл. инженер КГУ (с 10.11.1957 г.) Гл. геолог КГУ</p>		
		<p>Машкара И.И.</p>			
<p>1958 г., 23 августа. Киевское геологическое управление Главгеологии УССР переименовано в Киевский геологоразведочный трест «Киевгеология» (КГТ), ТГФ — в УТГФ, ТКЗ — в УТКЗ, Укр. отд. ВНИГРИ — в УкрНИГРИ</p>	<p>Главгеология при Совете Министров УССР Министерства геологии и охраны недр СССР 1963—1965 годы. Министерство геологии и охраны недр СССР преобразовано в Государственный геологический комитет СССР</p>	<p>Швед-Шуст Ф.М.</p>	<p>Зам. начальника КГУ Нач. геологического отдела КГУ</p>		
		<p>Ершов В.А.</p>			
		<p>Московченко А.М.</p>			
		<p>1965 г. Киевский геологоразведочный трест «Киевгеология»</p>	<p>18 февраля 1965 г. на базе Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров УССР образован Государственный производственный геологический комитет УССР</p>	<p>Стукало А.П.</p>	<p>Зам. управляющего КГТ Начальник геол. отдела КГТ, с 1962 г. — гл. геолог КГТ Ст. инженер геол. отдела, с 1962 г. — начальник геол. отдела КГТ Ст. инженер геол. отдела КГТ Ст. инженер геол. отдела КГТ (с 1962 г.) гл. гидрогеолог КГТ Ст. инженер геол. отдела КГТ Начальник производственно-технического отдела КГТ</p>
				<p>Пивовар И.С.</p>	
				<p>Белоус Я.Т.</p>	
				<p>А.Е. Фурса</p>	
				<p>Галака И.И.</p>	
				<p>Кириченко Н.Г.</p>	
				<p>Иващенко А.П.</p>	
<p>1965 г. Киевский геологоразведочный трест «Киевгеология»</p>	<p>18 февраля 1965 г. на базе Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров УССР образован Государственный производственный геологический комитет УССР</p>	<p>Артемченко В.И.</p>	<p>Зам. управляющего КГТ (с 1962 г.) Гл. геофизик КГТ (с 1962 г.) Ст. инженер геол. отдела (с 1962 г.) —«— —«— —«— Ст. инженер геол. отдела (с 1965 г.)</p>		
		<p>Андрух В.И.</p>			
		<p>Гойжевский А.А.</p>			
		<p>Усиков И.Д.</p>			
		<p>Пастухов Г.И.</p>			
<p>Воробьева Н.Г.</p>					
<p>Галака А.И.</p>	<p>Галака А.И.</p>				

Киевский геологоразведочный трест Государственного геологического комитета УССР Министерства геологии СССР (с 30 апреля 1965 г.)	30 апреля 1965 г. было образовано Министерство геологии СССР				
Киевский геологоразведочный трест Министерства геологии УССР (с 23 октября 1965 г.)	23 октября 1965 г. Государственный геологический комитет УССР преобразован в Союзно-республиканское Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР	Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР			Швец-Шуст Ф.М.
					Стукало А.П.
					Иващенко А.П.
					Андрух В.И.
					Галака И.И.
					Расточинский С.В.
					Котиков М.А.
					Коренев И.В.
					Иващенко А.П.
					Швец-Шуст
1966 г., 17 июня. Киевский геологоразведочный трест		Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР			Андрух В.И.
					Галака И.И.
					Расточинский С.В.
					Андрух В.И.
					Котиков М.А.
					Коренев И.В.
					Иващенко А.П.
					Швец-Шуст
					Стукало А.П.
					Расточинский С.В.
1967 г. Киевский геологоразведочный трест		Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР			Галака И.И.
					Андрух В.И.
1970 г. Киевский ордена Ленина геологоразведочный трест		Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР			Те же (см. 1967—1968 годы)
					+ Чередник П.Е.
1972 г. Киевский геологоразведочный трест		Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР			Те же
1973 г. Киевский геологоразведочный трест		Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР			Злобенко И.Ф.
					Остальные — те же

1975 г. Киевский геологоразведочный трест	Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР	Борисенко С.Т.	Гл. геолог КГТ
		Остальные — те же	
1976 г. Киевский геологоразведочный трест	Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР	Зайонц О.А.	Гл. инженер КГТ
		Остальные — те же	
1977 г. Киевский геологоразведочный трест	Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР	Металиди С.В.	Гл. геолог КГТ
1979 г. На базе Киевского геологоразведочного треста «Киевгеология» с 01 июня создано Северо-Украинское Государственное геологическое объединение «Севукргеология»	Министерство геологии УССР, Министерство геологии СССР	Злобенко И.Ф.	Генеральный директор объединения

## 60 лет в строю: к геофизической стороне одной биографии и не только

© В. А. Ентин, 2017

ГП «Украинская геологическая компания», Киев, Украина  
Поступила 25 июля 2017 г.

*Я знал одной лишь думы власть,  
Огню — но пламенную страсть.*  
М.Ю. Лермонтов, «Мцыри»

**Введение.** Приближается знаменательная дата — 100-летие образования Геологической службы Украины, в действующих рядах которой я состою уже более 60 лет. Надо сказать, что это ее второй 100-летний юбилей. Первый она встречала в 1982 г. еще в составе общей структуры союзного Министерства геологии по дате образования Геологического комитета царской России. К тому юбилею я был награжден медалью «За заслуги в разведке недр», которой очень горжусь, и всегда надеваю ее к ежегодному празднику Дня геолога. Весь мой трудовой путь и профессиональная карьера, от младшего техника-оператора до главного геофизика Центра геофизических исследований (ЦГИ), связаны с одним предприятием, ныне называемым Государственным предприятием (ГП) «Украинская геологическая компания» — ближайшим восприемником структуры и традиций Геологического комитета Украины образца 1918 г. Строго говоря, прямым юридическим наследником организованной в том году геологической структуры Украины был орден Ленина геолого-разведочный трест «Киевгеология». Впоследствии он неоднократно изменял свое официальное название, по сути, будучи тем же трестом. Поэтому все упоминаемые в дальнейшем события, в нарушение исторически существовавших на то время названий, будем связывать с трестом «Киевгеология».

За период моей столь продолжительной деятельности неузнаваемо изменились все

социально-экономические условия жизни страны, что не могло, естественно, не сказаться и на работе геологической службы. В преддверии отмечаемой годовщины возникает естественное желание вспомнить, оглянувшись назад, основные вехи на своем жизненно-трудовом пути, коллег-товарищей по работе, понять и оценить, с какими достижениями и потерями встречает знаменательную дату геофизическая служба нашего предприятия. Настоящие заметки, конечно, не претендуют на полную картину становления геофизической службы треста, а носят во многом мемуарный характер, отражая лишь сугубо личный опыт и взгляд на прошедшие события и сопутствующие им производственные и бытовые обстоятельства. Надеюсь, что эти записки смогут напомнить и окружавшим меня коллегам годы их небезопасной для страны трудовой жизни. Молодому поколению геологов, возможно, будет интересно узнать некоторые организационно-бытовые и производственные подробности работы низовых геофизических подразделений, которые были присущи нашему времени. В конце концов, в преддверии юбилейной даты мне, как одному из старейших ветеранов — производственников, хочется просто напомнить и обобщить все основные, известные для меня, зримые достижения геофизической службы треста «Киевгеология» и донести их до более широкого круга заинтересованных читателей. Надеюсь, что и мои

внуки, правнуки прочитают когда-нибудь эти заметки и узнают, чем занимался их предок всю свою взрослую жизнь.

**Профессиональное становление.** Первые шаги моей трудовой деятельности начались весной 1959 г. в Побужской геофизической партии (ПГП) Комплексной геофизической экспедиции треста «Укрнефтегеофизика», куда я получил направление после окончания группы Г-43 Киевского геолого-разведочного техникума (КГРТ), входившего тогда в структуру Министерства геологии СССР. Основной заботой экспедиции были нефтяные работы, а рудные партии находились на второстепенных ролях. Но уже вскоре все низовые подразделения такого рода были объединены в самостоятельную Киевскую геолого-геофизическую разведочную контору. Только значительно позже, в 1966 г., эта структура, для которой к тому времени в пос. Бортнички под Киевом была построена стационарная производственная база с сопутствующими социально-жилищными объектами, но уже под другим названием, была передана в состав треста «Киевгеология». В конце же 1950-х — начале 1960-х годов низовые геофизические и геологические партии относились к организациям различного подчинения, а взаимосвязь между ними, передача геофизических материалов под бурение осуществлялись обычно на уровне личных контактов исполнителей.

Стационарная база ПГП находилась в с. Верхнячка, в 6 км от узловой железнодорожной станции (райцентра) Христиновка, что вблизи г. Умань. Христиновка была основным поставщиком наемных водителей и рабочих для работы в поле. В Христиновке родился многократный лауреат Сталинских премий, драматург, писатель и публицист Александр Корнейчук, чьи пьесы ставились во всех театрах Союза, а по его сценариям снимались кинофильмы. Все свои денежные премии он передавал на благотворительные цели. Его стараниями в Христиновке были построены школа, клуб с библиотекой. Здесь же родился другой известный украинский писатель Юрий

Дольд-Михайлик, детективным романом которого «І один у полі воїн», предтечей романа Ю. Семенова «Семнадцать мгновений весны», мы зачитывались в школе. Так что и помимо Тараса Шевченко, Черкашине есть весомый повод гордиться значительным вкладом, теперь, к большому сожалению, незаслуженно забытым, который внесли земляки Христиновки в развитие и популяризацию украинской литературы.

Начальником ПГП был Александр Тихонович Ващенко, как я узнал позже, выпускник нашего техникума. Вторым, фактически также руководящим лицом партии был его заместитель по хозяйственной части и председатель профсоюза Александр Мечиславович Сингаевский. Нарушая хронологию своих воспоминаний, я не могу не сказать несколько больше про первых руководителей ПГП. На то время им было, очевидно, около 40 лет. Оба были фронтовиками, держались от нас на определенной дистанции, но пользовались большим авторитетом. Они никогда не рассказывали о событиях своего военного пути. У А. Т. Ващенко после ранения на лбу осталась небольшая вмятина. Лишь гораздо позже я узнал от А. М. Сингаевского, что, обладая абсолютным слухом, на фронте А. Т. Ващенко был в рядах «слушачей», в задачу которых входило задание пробираться на нейтральную полосу и заранее предупреждать о приближении немецких самолетов, оповещать обо всех подозрительных шумах за линией фронта.

Свои посещения полевого отряда они всегда совмещали с днями выдачи зарплаты, а заодно проводили с нами воспитательные беседы. До сих пор вспоминаются обстоятельства одной из таких бесед. Большинство состава партии были холостяками, и после работы мы часто проводили свободное время в «чайной» за столиками. Как-то вечером, когда мы небольшой компанией операторов и водителей сидели за столиком этого заведения, двери открылись и вошли приехавшие к нам А. Т. Ващенко и А. М. Сингаевский. Оглядевшись, они издали кивком головы поздоровались

с нами и, не сказав ни слова, ушли. Наутро всех нас — техников, принимавших участие во вчерашней посиделке, вызвали на «ковер». Смысл обращенной к нам речи А. Т. Ващенко состоял в том, что мы, как младший, но все-таки руководящий персонал, не имеем морального права быть запахибрата с водителями и выпивать вместе с ними. В противном случае, они и на работе не очень-то будут воспринимать нас как руководителей. Подобная этика внутрибригадного общения, к сожалению, в настоящее время полностью ушла в прошлое.



Ващенко Александр Тихонович —  
начальник группы побужских партий  
(1960—1970)

В середине 1960-х годов руководители партии перевелись на работу в Киев. А. Т. Ващенко, после окончания специальных курсов в Москве, возглавил при экспедиции лабораторию, став в Украине главным специалистом по ремонту гравиметров и другой геофизической аппаратуры. К большому сожалению, он умер, не дожив немного до 50 лет. А. М. Сингаевский впоследствии работал начальником отдела труда и заработной платы экспедиции. В 1970-годах, когда я уже состоял в должности главного геофизика партии, А. М. Сингаевский предложил дать мне рекомендацию для поступления в Коммунистическую партию Советского Союза (КПСС). Следует отметить, что меня, как

лицо определенного административного статуса, временами приглашали на партийные собрания, когда там обсуждались различные хозяйственные вопросы. По своему характеру я не просто отсиживал положенное время, а часто выступал с какими-то предложениями или критическими замечаниями. Зная мою активную жизненную позицию еще с первых шагов трудовой деятельности в ПГП, А. М. Сингаевский и принял такое ответственное для него решение. Надо понимать, что в то время существовало неписаное правило, «прежде чем принять в партию одного инженерно-технического работника (ИТР), следовало вначале пополнить ее ряды двумя рабочими».

Ввиду специфики геофизических работ в штате нашей экспедиции таких людей было немного. Более того, на появившиеся вакансии прежде всего претендовали начальники геофизических партий (среди них уже были мои одногодки Н. Прядун, А. Кравченко) и другие «ответственные» сотрудники аппарата. Вследствие такой квоты или по другим причинам, мой процесс поступления в КПСС затормозился и не получил дальнейшего развития, что не помешало мне поддерживать с А. М. Сингаевским добрые взаимно уважительные отношения еще долгое время. Гораздо позже описываемых событий, в первое десятилетие независимости Украины, мою общественную активность все-таки оценил трудовой коллектив треста «Киевгеология», дважды делегировав меня в состав Центрального комитета (ЦК) отраслевого профсоюза и избрав председателем комиссии по трудовым спорам.

Однако вернемся к моему первому прибытию в Верхнячку. После короткой беседы со мной А. Т. Ващенко определил меня на должность младшего техника-оператора на магниторазведку с окладом 550 руб., и в тот же день на попутном грузовике партии я отправился по старому Одесскому «шляху» (тогда современная автотрасса Киев—Одесса еще только строилась) в поселок городского типа (пгт) Завалье Гайворонского р-на Кировоградской обл., где

располагалась база полевого отряда. Основная направленность деятельности нашего отряда заключалась в обеспечении геофизическими материалами геологических партий треста «Киевгеология», которые в то время вели поисково-съёмочные работы вокруг уже открытого в Первомайско-Голованевском районе месторождения силикатного никеля. По современным меркам это была крупная экспедиция — несколько магнитных бригад (магнитометры М-2, Fanzelay), трехсменная бригада для работы с гравитационным вариометром Z-40, две гравиметрические бригады (гравиметры СН-3 и Норгард), электроразведочная бригада (потенциометр ЭП-1). В состав полевого отряда входило также несколько топогеодезических бригад, камеральная группа, водители (6—7 грузовиков ГАЗ-51 и ГАЗ-63, легковой вездеход ГАЗ-67), нанимаемые на месте рабочие. Таким образом, в пик полевых работ списочный состав этого так называемого полевого отряда превышал полсотни человек. Для сравнения укажем, что в штате нынешнего ЦГИ ГП «Украинская геологическая компания», который объединил все бывшие геофизические партии треста «Киевгеология», включая Аэромагнитную и Каротажную, числится всего около 40 человек.

Побужская партия вела круглогодичные полевые работы, хотя и несколько сокращала их объёмы в зимний период. Недействующая на этот период часть ИТР переводилась на камеральные работы в Верхнячку или Киев. Ежедневно полевые бригады в кузовах грузовиков доставлялись на работу в поле. Машины были оборудованы только поперечными деревянными скамейками. Несколько позже начали ставить брезентовые тенты, тем не менее зимой ехать было холодно. Мы стелили в кузов солому, ложились туда покатом и с песнями (пели в основном девушки) ехали на участок в поле. Не имея с собой карты, я долго не мог запомнить, как и какими путями нас доставляют на нужное для работы место. На производственной практике на участок в тайге мы всегда ходили напря-

мую пешком, ориентируясь по азимуту с помощью буссоли или по солнцу. Здесь же, от базы партии до рабочего профиля, приходилось ехать на машинах по однообразным полевым дорогам вдоль посадок с бесконечной чередой поворотов. Только со временем по каким-то незначительным приметам были выработаны необходимые навыки ориентации в полях Украины, а до тех пор приходилось полагаться на более опытных товарищей.

Существовала четкая, хотя и неофициальная оценка престижности операторского труда. На первом месте стояла деятельность вариометрического отряда (операторы Г. С. Руденко, С. Носенко, Галиберда). Это были уже семейные люди. Без специального образования, они получили практические навыки еще на Полтавщине под руководством известного учено-геофизика Зинаиды Александровны Крутиховской. Работы с вариометром велись в круглосуточном режиме. Технология работы с вариометром оставляла операторам много внутрисменного свободного времени, которое они использовали не без корысти для себя, собирая на колхозных полях, в зависимости от сезона, кукурузу, подсолнухи и все остальное, что годилось на корм людям и скотине. Отработав сутки, операторы сменялись, сдавали материалы в «камералку» и уезжали на отгулы.

Особняком, возможно в силу тогдашней засекреченности, стояла гравиразведка (операторы Денис Розка и Александр Санеев). Партия выполняла маршрутно-площадную съёмку масштаба 1:200 000, что уже предполагало ежедневные дальние разъезды гравиметрических бригад, поэтому в их пользовании постоянно находились две машины, в том числе единственная легковая ГАЗ-67. Эти бригады только по необходимости возвращались на базу партии и в целом не очень участвовали в повседневной жизни молодежного состава ППП.

Электроразведочная бригада (оператор Гриша Пивень) выполняла профильные работы методами симметричного и комбинированного профилирования. За ней также была закреплена отдельная машина.

Самой многочисленной и молодежной, а возможно, по этой причине и менее престижной, считалась работа в магниторазведочных и топографических отрядах, исполнители которых ежедневно выезжали и возвращались на базу партии. Как ни странно, именно из этих «малопрестижных» бригад вышла большая часть будущих специалистов, связавших всю свою дальнейшую карьеру с геологией (Н. П. Прядун, В. В. Баран, А. П. Мычковский, В. А. Ентин и др.).

Камеральная группа партии была целиком женская и состояла в основном из жен операторов и начальников отряда. Только в простойные дни и в случаях необходимости получения от нас некоторых уточнений по записям в полевых журналах нас иногда приглашали в «камералку», где стоял беспрерывный громкий треск арифмометров.

Сложной и непонятной по своей идеологии выглядела система оплаты труда. Согласно заложенным в нее положениям, всем сотрудникам полевых партий, которые не возвращаются ночевать на место постоянной прописки, была положена выплата полевого довольствия, размер которой зависел от производственного статуса работника. ИТР полагалась выплата в размере 60 % месячного оклада, служащим — 40 %, рабочим — 25 % (в 1960-х годах выплата полевого довольствия была уравнена для всех работников, вне зависимости от их статуса, в сумме 40 %). За круглогодичный характер работы нам полагалась также 20-процентная надбавка к окладу. Помимо этой повременной системы оплаты труда для всех занятых на выполнении нормируемых видов полевых работ рабочих и ИТР топогеодезического отряда параллельно действовала сдельщина. Для геофизиков-операторов складывалась парадоксальная ситуация, когда от их усердия зависел заработок закрепленных за ними рабочих, но что никак не влияло на их месячную зарплату. Мотивировка такой странной комбинированной внутрибригадной системы оплаты труда, с которой я впервые столкнулся еще в 1958 г.

в Эвенкии, где проходил на должности рабочего 4-го разряда производственную преддипломную практику, так и осталась для меня тайной. Можно только предположить, что сдельная оплата операторского труда потенциально могла привести к ухудшению качества полевых материалов, а следили за ней довольно жестко, иногда даже и не совсем этично. Нам строго лимитировали минимально допустимое время работы на одном пункте наблюдений. Карандашные записи в полевых журналах наблюдений необходимо было вести разборчиво и чисто, что не всегда по объективным причинам удавалось. Все исправления следовало подтверждать личной подписью. Практиковались тайные от нас выезды руководства партии или отряда в поле и скрытые наблюдения за работой операторов в бинокль из посадок. В качестве устрашения всем рассказывали, что за год до моего появления в Завальевском отряде за «халтуру» был уволен инженер-оператор В. Б. Бурьянов.

Величина установленного месячного оклада ИТР зависела от занимаемой должности. Внутренняя градация должностей была незначительной. Первоначально у меня, младшего техника-оператора, месячный оклад составлял 550 руб. С учетом общей надбавки в размере 80 % набегало 990 руб. в месяц. После деноминации рубля в 1961 г. всем техникам были установлены оклады в пределах 65—70 руб. К юбилейным датам, праздникам «победители социалистического соревнования» награждались почетными грамотами или денежной премией в размере 15 руб. По официальному статусу грамота считалась наградой более высокого уровня, но, что греха таить, мы больше предпочитали материальное вознаграждение. Как-то наш оператор В. Баран после очередного награждения грамотой открыто заявил, что ему в следующий раз желательно получить премию. У меня за годы операторской работы накопилось более десятка подобных грамот, которые в настоящее время стали документальными свидетельствами нашей «боевой» молодости.



Насколько достаточною для молодого человека была получаемая мною в то время зарплата? Сложно ответить на поставленный вопрос, исходя из современного социально-экономического состояния основной части общества. В то время у подавляющей части населения были совершенно другие запросы и интересы. К сожалению, уже не помню тогдашних расценок на основные потребительские группы товаров.

Как поселение Завалье было основано на левом берегу р. Южный Буг в 1654 г. Очевидно, в те времена это было довольно глухое место. Во время Великой Отечественной войны здесь по речке проходила граница между немецкой (левобережной) и румынской оккупационными зонами, чем пользовалось, по рассказам старожилов, местное население, занимаясь мелкой контрабандой. По моему прибытию в пгт Завалье это был довольно крупный, четко разделенный на две части населенный пункт. Его нижняя (южная) часть представляла собой обычное колхозное село, где основной люд был занят на различного рода сельхозработах. Верхняя (северная) часть носила черты рабочего поселка, где частный сектор перемежался с производственными сооружениями и жилищными постройками государственной принадлежности. Здесь еще с 1935 г. действовал крупнейший в СССР графитовый комбинат (ЗГК), продукция которого расходилась в десятки стран. В 1958 г. была прекращена небезопасная добыча графита шахтным способом и продолжена его карьерная выемка. На комбинате и карьере работало немало местной и приезжей молодежи, которая неплохо зарабатывала. В поселке находились хорошая многопрофильная больница, средняя общеобразовательная школа и детский интернат. Функционировала свободного доступа дешевая заводская столовая, которая снабжалась через ОРС (отдел рабочего снабжения), и за 2—3 руб. можно было получить хороший обед. Все это по тем меркам определяло довольно высокий материальный уровень жизни местного населения. Ко времени

моего приезда уже заканчивалась отработка заречного карьера, а еще через 2 года на месте сельского кладбища началась закладка нового разреза.

В настоящее время посредине поселка образовалась рукотворная выемка глубиной значительно более 100 м с высокими, заросшими кустами и кривыми деревьями, отвалами пустой породы на поверхности, что окончательно оформило разделение села на две части. Так, каким-то таинственным образом через 300 лет подтвердилась справедливость топонимики этой местности. Надо отметить, что профессия горняка, геолога была зримой и пользовалась престижем у местного населения. Из рядов завальевских школьников того времени выросла целая плеяда будущих геологов, с которыми в дальнейшем, в процессе нашей общей профессиональной деятельности, мне пришлось много лет встречаться и сотрудничать. Это, конечно же, Вениамин Викторович Зюльцле, который после окончания Одесского университета стал одним из заметных геологов-съемщиков Правобережной геологической экспедиции (ПГЭ) и с которым мы плодотворно сотрудничали и продолжаем работать на территории его малой родины — в Среднем Побужье. Вячеслав Петрович Николаевский, как и Вениамин Викторович Зюльцле, после школы пошел в геологию и долгое время в составе поисковой партии (начальник А. А. Янгичер) той же ПГЭ вел поисково-разведочные работы на графит в районе Завалья. Ныне он — главный геолог ЗГК. Никто лучше него не знает историю открытия и геологические особенности строения этого уникального мирового значения месторождения. В. П. Николаевский стал бессменным гидом по графитовому карьере, который посещают многочисленные группы студентов украинских и зарубежных вузов, геологи и научные сотрудники профильных институтов Национальной академии наук Украины. В ряду с названными фамилиями не могу не назвать и их земляка Василия Засухина. Я впервые встретился с ним в начале его производственной карьеры, в 1970-х годах,

когда он после окончания КГРТ прибыл на полевые работы в с. Молдовка. Ему сразу поручили ответственное и непростое дело по ведению геологического обслуживания буровых станков ПГЭ, занятых тогда на разведке одноименного месторождения железа. К тому времени я уже был довольно хорошо знаком со «спецификой» такой работы, в состав которой входили не только прямые обязанности по ведению полевой геологической документации керна, но и полный повседневный технический контроль за процессом бурения. Поэтому было удивительно наблюдать, как ему, совсем молодому специалисту, удавалось отстаивать и аргументировать свое мнение и не поддаваться на обычные уговоры буровиков проставить им в журнале более высокую по условиям бурения категорию кристаллических пород или же без контрольного замера записать метраж сменной проходки. Профессиональные и личные поведенческие принципы для В. Засухина были неразделимы, он всегда, при всех поворотах своей судьбы, следовал им неукоснительно. Когда геологическая партия уехала из Завалья, В. Засухин оставил работу в геологии. К огромному сожалению, он тяжело заболел и рано ушел из жизни. Окончила КГРТ по специальности геофизика и моя жена Е. А. Гупалюк, родом из Завалья. После 10 лет жизни со мною в поле она еще долгое время работала в производственном объединении «Укрнефть». Как видно из изложенного, помимо важного источника добычи и получения графита Завалье стало поставщиком кадров для геологической отрасли.

Однако возвратимся к начальному этапу моего пребывания в пгт Завалье. Холостяки (в их числе был и я) снимали квартиры у местных жителей, как правило, со «столом», который включал двухразовое (утром и вечером) питание и обеденный «тормозок», состоявший из пары вареных яиц, куска сала и тому подобного. Обходился нам такой комплексный пансион в 350—400 руб. в месяц. Запомнилось, что бутылка армянского коньяка «КВ» в буфете ЗГК стоила около 30 руб.

По воскресеньям мы часто ездили на базар в северный райцентр Одесской обл., пгт Саврань. До войны это было типичное еврейское местечко со всеми полагающимися ему атрибутами, но и в то время здесь еще можно было услышать разговоры в стиле одесских рассказов И. Бабеля.

Благодаря удобной расположенности Саврани на стыке четырех областей Украины и Молдавии, сюда на базар еженедельно съезжалось множество крестьян с передвижными колхозными торговыми лавками и продукцией собственного производства. Все это придавало местному базару особый ярмарочный колорит, куда люди шли не только за покупками, но и для общения, обмена новостями и просто поговорить. Это были не нынешние базары, где продаются в основном завезенные издалека импортные продукты и промышленные изделия. На прилавках стояли местного изготовления бочки домашнего вина, дешевые молочные и мясные продукты, самые разнообразные ягоды, фрукты и овощи. Продавали много речной рыбы (судаки, золотистой окраски караси, плотва), которая до зарегулирования р. Южный Буг плотинами Ладыжинской и Гайворонской электростанций в изобилии водилась в ней. Разрешалось торговаться и пробовать все это богатство. Только за счет такой «халавы» можно было совершенно бесплатно напиться и закушаться.

Надо объяснить современному читателю, в чем причины сложившегося тогда обилия и дешевизны местной продуктовой продукции. Дело в том, что в колхозах существовали отдельные бригады, которые специализировались исключительно на выращивании всевозможных огородных и бахчевых культур. Я застал еще время, когда в местных колхозах занимались разведением шелкопряда. Их коконы раздавали местному населению для выкармливания листьями специально высаженных низкорослых густых акаций, заросли которых сильно досаждали нам в поле. Но поскольку оплата труда колхозников производилась по заработанным трудодням в конце года и в основном в виде выращенной ими

же сельхозпродукции, местное население всегда нуждалось в живых деньгах.

Не было для нас проблемой пойти в ресторан и оставить там после групповой посиделки около 50 руб. Оставались еще небольшие деньги на текущие нужды и даже на помощь родителям. В 1966 г., когда у меня уже была семья, мы с женой (тоже техник-геофизик) сумели собрать 1400 руб. для первого взноса на кооперативную двухкомнатную квартиру на первом этаже панельного дома, где я и проживаю до сих пор. Примерно через 30 лет, на закате советской власти, поднявшись по карьерной лестнице до главного геофизика крупной геофизической партии, я заработал оклад в 185 руб., но это было уже другое время, другие цены и условия оплаты труда.

Неожиданным для меня был образовательный уровень ИТР нашего отряда. В 1958 г. я проходил практику в полевой партии Северо-Енисейской геофизической экспедиции с местом базирования в п. Маклаково (ныне пос. Лесосибирск) Красноярского края. Несмотря на такую удаленность, почти весь ее состав ИТР был укомплектован дипломированными специалистами. К моему удивлению, в ПГП на тот период существовала совершенно другая ситуация. Несмотря на киевское расположение основной кузницы геологов-геофизиков среднего звена — КГРТ, и наличие в Украине нескольких вузовских специализированных факультетов, инженерно-технический персонал ПГП в своем большинстве состоял из практиков, не имевших профильного образования. Так, из многочисленного операторского состава полевого отряда дипломированными техниками были лишь по одному оператору на электроразведке и гравиразведке, а также вместе со мной и Светой Донской (тоже выпускницей нашей группы КГРТ, вместе с которой мы были направлены в ПГП) три оператора на магниторазведке. Самый опытный среди нас, оператор-магниторазведчик Володя Баран, лишь год назад вернулся в Украину из Хакасии. Он до сих пор работает в КГРТ и передает

студентам свой богатый производственный опыт. Техническим руководителем партии был Василий Иванович Сержин — метеоролог с высшим образованием. Менявшиеся время от времени начальники Завальевского отряда — Ю. С. Маулик, Г. С. Руденко, С. Д. Добрев, тоже были практиками. С высшим профильным образованием в отряде был только выпускник Львовского политеха Иван Иванович Майстер, к сожалению, рано ушедший из жизни. Он руководил электроразведкой, а позже несколько лет служил начальником разных геофизических партий.

Понимание причин сложившейся кадровой ситуации пришло ко мне значительно позже. Страна в послевоенный период в целом испытывала ощутимый недостаток квалифицированных кадров, особенно мужского пола. Уже были открыты сибирские алмазы, новые тюменские нефтяные месторождения и т. д. Фамилии геологов-первооткрывателей из тех регионов ежегодно встречались в списках лауреатов Государственной и Ленинской премий. Работать там считалось профессионально престижным и материально выгодным, поэтому большая часть послевоенных выпускников вузов и техникумов отправлялась на работу в отдаленные более перспективные в поисковом и карьерном отношении регионы страны. В Украине, особенно для организаций базового столичного размещения, ситуация с молодыми специалистами дополнительно осложнялась трудностями в получении ими постоянной прописки и, соответственно, малыми перспективами на будущую собственную жилплощадь в Киеве. Именно отмеченные обстоятельства и были, по моему мнению, основными причинами недостаточного профессионального уровня образования большинства инженерно-технического состава ПГП того времени.

Однако уже вскорости сложившаяся кадровая ситуация стала заметно выправляться. В полевые партии пошел заметный приток дипломированных специалистов за счет новой волны молодых выпускников вузов и техникума. Именно в конце 1950-х

годов в полевых отрядах Волынской геофизической партии на Житомирщине и в ПГП начинали свою карьеру нынешний директор Института геофизики им. С. И. Субботина, академик НАН Украины Виталий Иванович Старостенко и член-корреспондент НАН Украины, известный тектонофизик и главный научный сотрудник того же Института Олег Борисович Гинтов. О. Б. Гинтов многие годы, до ухода на научную работу, был ведущим специалистом-геофизиком Киевской комплексной геофизической экспедиции, уже структурно входившей в трест «Киевгеология».

В начале 1960-годов в ПГП приехали приглашенные из восточных районов страны и получившие позже широкую профессиональную известность супружеская чета геофизиков — Октавий Григорьевич Яненко и Маргарита Ивановна Матасова, геофизики Борис Назарович Середа и Владимир Назарович Белогуб. Начался активный процесс передачи их опыта, накопленного при работах в других геолого-геофизических условиях, в производственную практику в Украине. Многие из молодых техников-геофизиков и операторов-практиков, решивших связать свою дальнейшую судьбу с геологией, поступали на заочное обучение в вузы и техникум. В их числе были я и будущий многолетний начальник ПГП Николай Петрович Прядун. Забегая вперед, отмечу, что профессиональному росту специалистов-геофизиков во многом способствовало их регулярное обучение на курсах и участие в работе научно-производственных тематических семинаров при профильных научно-исследовательских институтах (НИИ) в Москве, Ленинграде, Алма-Ате (лично я трижды побывал на подобных курсах). Немаловажно, что геофизические работы, как правило, велись в напряженном темпе по одногодичным проектам, а часто и по нескольким объектам одновременно, благодаря чему у исполнителей быстро накапливался необходимый опыт, шел ускоренный профессиональный рост ведущего звена геофизических партий.

Но вернемся к первоначальному этапу моего трудоустройства. Как описано выше, начинал я свою операторскую деятельность с оптико-механического магнитометра М-2, который сейчас вообще мало кто помнит. По технологии следовало работать парами. Оператор переносил с точки на точку треногу с буссолью, а его помощник, как правило, девушка (записатор), подносил магнитометр. После определенных действий оператор брал отчет, который записывал в полевой журнал его помощник. Далее процесс перехода на следующую точку и наблюдений повторялся. И так, с небольшим перерывом на обед, ежедневно, стоя на ногах 7—8 часов, доводилось проходить до 10—15 км. Существовала 6-дневная рабочая неделя (5-дневная рабочая неделя на производстве была введена в СССР только в 1967 г.). Дополнительные выходные приходились на так называемые простойные дни, связанные с невозможностью работы в поле по метеоусловиям (дождь, метель и т. п.). В таких случаях следовало составлять «акты на простой» и заверять их в тот же день в ближайшем к месту непосредственного проведения полевых работ сельсовете. Процедура была достаточно хлопотной, и поэтому мы обращались к ней лишь в крайних случаях, а при небольших осадках обычно продолжали работать, прикрывая себя и прибор плащом. Тяжело, особенно для наших помощниц, давалась работа весной и осенью, когда в поле при каждом переходе между точками на сапоги наматывались килограммы липкого чернозема. Неприятно было работать и в период выпадения по утрам обильной росы, когда до полудня ходили по посевам пшеницы мокрыми по пояс. Своими особенностями отличалась магнитная съемка в населенных пунктах, где приходилось постоянно перелазить через заборы, пробираться через частные огороды и дворы с собаками и при этом постоянно отвечать на расспросы селян «а що це ви робите?». У всех наших операторов было с собой удостоверение личности с просьбой к советским и партийным органам содействовать в выполне-

нии возложенных на нас государственной важности служебных обязанностей, но я не помню ни одного случая, чтобы мне пришлось его когда-либо использовать. В связи с этим теперь я не могу даже представить, каким образом в современных условиях полной частной собственности и отсутствии актов государственного законодательства, регламентирующих ведение геолого-разведочных работ, вообще

возможно проводить столь масштабные площадные геофизические съемки.

Случались с нами и частные курьезные неприятности производственно-бытового характера. Однажды при переходе зимой замерзшего пруда провалился под лед наш оператор В. В. Баран. Хорошо, что произошло это уже недалеко от берега, и он сам сумел выбраться из воды и добежать до стоящей недалеко автомашины. Не-



однократно бывало так, что вечером после завершения работы в поле мы по различным причинам не могли вернуться на базу партии и тогда приходилось искать неустроенный ночлег в ближайшем селе или на полевых станах. Случались и совсем смешные, казусные «происшествия». В первый же год своей работы, осенью, я столкнулся с совершенно незнакомым для меня, городского жителя, обычаем широко отмечать «храмные праздники» в селах. В гости на такие праздники съезжались на телегах (личных машин тогда в селах почти не было), сходились все близкие и дальние родственники и просто знакомые из окружающих сел. Хозяева долго готовились к такому празднику, специально к этой дате гнали самогон и готовили угощения. Пировали обычно в течение не менее двух суток, пока не выпивалось и не съедалось все заготовленное к этим дням. Во время одного из таких «сабантуев» в с. Осички, а я как раз там выполнял съемку, меня вместе с помощницей звали пообедать хозяева одного подворья. Отказываться было неудобно, и мы зашли в хату, где за столом в подпитии уже сидело несколько человек. Пришлось согрешить и мне — выпить пару рюмок. Выскочив из темной хаты на свет, я несколько потерял ориентировку и с треногой прибора в руках подался в сторону собачьей будки, откуда с рычанием выскочил пес. Я инстинктивно дернулся от него и угодил в прикрытую соломой полупустую жомовую яму. К счастью, все обошлось. Хозяева помогли мне выбраться из западни, но после этого мне уже как-то совсем расхотелось работать, и я пошел к ожидавшей меня машине.

О наших водителях следует рассказать отдельно. В своем большинстве это были уже семейные, но еще относительно молодые люди. Как правило, они вывозили наши полевые бригады на участок, и если не предвиделось внутрисменных переездов, то оказывались предоставленными сами себе. Проводили водители свое свободное время по личному усмотрению, отдыхая или занимаясь мелким ремонтом автомобиля. Более деятельные натуры иска-

ли подработок у местного населения. Надо знать, что тогда практически отсутствовало регулярное автобусное сообщение между селами, как и не было у селян собственных машин, поэтому спрос на автомобильные услуги с их стороны был постоянный. Свободных денег было не густо, и нередко с водителями расплачивались бутылкой самогона с соответствующей закуской. В результате бывало, что за нами они приезжали в заметном подпитии. К счастью, ввиду совсем малой интенсивности автомобильного движения по полевым дорогам и, по современным меркам, тихоходности машин, я не помню серьезных случаев ДТП по причине нетрезвости наших водителей. Тем не менее, приезжая за нами вечером на подпитии или опоздав к назначенному часу, они старались как-то загладить свою вину. Стандартным искуплением вины с их стороны было предложение дать нам самостоятельно порулить. Мы все, как бы предугадывая будущую повсеместную потребность в водительских правах, стремились научиться управлять автомобилем, и к обоюдному удовлетворению назревавший конфликт быстро исчерпывался. Когда в 1968 г. мне пришлось официально учиться на водительских курсах при ДОСААФ, то благодаря такой, скажем прямо, незаконной практике езды я не имел проблем при сдаче экзамена по вождению автомобиля ГАЗ-51.

Я недолго работал с магнитометром М-2. Отряд получил новый немецкий Н-магнитометр, который измерял горизонтальную составляющую магнитного поля Земли. Прибор был в единственном экземпляре, и, чтобы ускорить съемку, нас с Володей Бараном определили на двухсменную с ним операторскую работу. Через несколько месяцев эта съемка «трагически» закончилась. Автомобиль, в котором ехал В. Баран по полю с прибором на руках, влетел в скрытую яму. В результате магнитометр разбился, и на этом закончился, как я теперь представляю, единственный опыт проведения подобной съемки в Украине. Память о ней, помимо меня и В. Барана, сохранилась разве что

в фондовых материалах треста «Киевгеология». После этого события я недолгое время поработал на электроразведке, выполняя опытные параметрические наблюдения методом зондирования у скважин. Это была комфортная работа, необремененная заботой о выполнении норм выработки. В моем полном распоряжении были отдельный автомобиль и большая бригада.

Но недолго судьба благоволила ко мне. Прислали нового оператора Сашу Киселева, ранее работавшего на Сахалине. Он был несколько старше нас, весь расписан наколками. Хотя я с ним позже довольно быстро сблизился, детали его биографии так и остались для меня не известными. Он часто вышивал, матерился, но при этом был сентиментален и совершенно бескорыстен. Бывая изредка в ресторане, он обязательно заказывал оркестру исполнение песни из поэмы Н. Некрасова «Меж высоких хлебов затерялся...», которая с тех пор стала для меня напоминанием о нашей молодости. Киселев проработал в нашей партии несколько лет, зимой отличился «халтурой» на магниторазведке, а потом перешел в «Укргипрпроводхоз», где вскоре спился и рано ушел из жизни.



Параметрические вертикальные  
электронзондирования, 1960 г.

За прибором ЭСК-1 техник геофизик В. А. Ентин

В 1960 г., закончив геофизические работы вокруг пгт Завалье, отряд глубокой осенью, в полную распутицу, перебазировался в райцентр Голованевск. Разместились по квартирам, но брать нас на пищевое

довольствие хозяева отказывались, и мы питались в чайной. В Голованевске чайных было две, и в борьбе за клиента они даже конкурировали между собою, позволяя постоянным клиентам иногда питаться в кредит до зарплаты. Осень и начало зимы 1961 г. запомнились жуткими туманами и полнейшей распутицей. Первые морозы пришли лишь к середине января. Несколько километров до участка работ приходилось ехать на грузовике-вездеходе более часа. Прямая видимость не превышала нескольких десятков метров. В таких условиях особенно нелегкой была работа геодезистов. Выручали леса, окружавшие Голованевск с трех сторон, в которых можно было ходить хотя бы без грязевого сопровождения.

Весной партия разделилась на два отряда, один из которых остался в Голованевске, а другой, в его составе оказался и я, переехал в г. Ладыжин Винницкой обл., где в то время начиналось строительство крупной тепловой электростанции. Я продолжал работать на магнитной съемке. Этот период стал для меня примечательным благодаря нескольким событиям в личной жизни. Дело в том, что почти все мои коллеги-сверстники по работе в партии к тому времени начали дружно поступать на заочные отделения профильных вузов Украины и Москвы. Я решил не отставать от них и тоже подал документы для поступления на заочное отделение геологического факультета Киевского государственного университета им. Т. Г. Шевченко. Вступительные экзамены предстояло сдавать летом. На это же время пришлось пора моей женитьбы. Времени на подготовку к экзаменам у меня особо не было, но я не очень об этом и беспокоился, считая, что запаса моих школьных знаний будет достаточно. Но не так «сталося, як гадалося». Первый удар по моим мечтам был нанесен, когда в приемной комиссии университета мне объяснили, что, поскольку я аттестован по украинскому языку в школе, на нем и следует сдавать вступительный письменный экзамен (сочинение). Больше чем на «тройку» по этому предмету я

не мог рассчитывать, и после того как на первом же экзамене по математике получил «четверку», решил не испытывать дальнейшую судьбу и забрал документы. Но права пословица «все что ни делается, только к лучшему». На следующий год я повторил попытку поступления, но уже во Львовский политехнический институт, где (нынешний читатель весьма удивится) допускалась по выбору сдача письменных экзаменов на любом языке.

Я продолжал работать на магнитной съемке, которая на тот период была сосредоточена на площади открытого ранее, в том числе по результатам изысканий ПГП, Кумаровского месторождения силикатного никеля. Лишь на пару месяцев в зимний период меня задеиствовали на работе с гравитационным вариометром. Это была довольно тяжеловесная аппаратура, которую переносили по профилю между точками наблюдений вручную два работника. Вариометры работали в автоматическом режиме, приводимом в действие от пружинного часового механизма. Время стоянки прибора на точке наблюдения составляло, в зависимости от его типа и необходимости получения тех или иных параметров гравитационного поля Земли, 1,5—2,5 часа. Приборы импортного производства были дорогими, поэтому большое внимание уделялось обучению операторов навыкам аккуратной с ними работы. Основным законом было неукоснительное выполнение определенной последовательности технологических операций при запуске и остановке прибора, нарушение которых грозило обрывом кварцевых чувствительных нитей измерительной системы прибора. Перед тем как мне доверили самостоятельную работу, я несколько смен стажировался у опытных наблюдателей. Тем не менее избежать полного конфуза при первом же самостоятельном круглосуточном дежурстве мне не удалось.

Запустив прибор, я с нетерпением ждал окончания его работы на первой точке, чтобы сразу же, по характеру записи результатов наблюдений на фотопластинке, оценить свою работу. Проявив фотопла-

стинку и обнаружив, что она совершенно пустая, я прежде всего удостоверился в технической исправности аппаратуры, а затем повторил весь цикл технологических операций на той же точке. К моему полному непониманию, результат оказался прежним. Делать было нечего и я, несмотря на то что лишал заработка трех рабочих своей бригады, принял решение не портить больше фотопластинок и прекратить бесплодные попытки, дождавшись сменщика. Всю ночь провели за игрой в карты, а утром приехал сменный оператор Г. С. Руденко.

Я объяснил ему суть сложившейся ситуации, и он сразу кинулся к прибору, чтобы проверить его исправность. Все было в порядке. Вернувшись в жилую будку, он выплеснул на улицу приготовленный мною для проявления фотопластинок раствор и начал готовить новый. Я ранее не занимался фотографией и поэтому внимательно следил за его действиями. Как и я, Г. Руденко сначала достал из одного конца цилиндрической картонной упаковки порошок растворителя и высыпал его в чашку. Далее с другого конца, он вынул еще какой-то небольшой пакетик, о наличии которого я даже не подозревал, и тоже высыпал его содержимое в раствор с проявителем. Г. Руденко пояснил мне, что это закрепитель, без действия которого на фотопластинке ничего не сохраняется. В этом и заключалась причина моих неудач при полном выполнении технологии работы непосредственно с вариометром. В дальнейшем моя работа на вариометрии протекала без заметных сбоев, а описанный случай стал хорошим уроком внимательного отношения ко всем тонкостям порученной работы.

Не без приключений, хотя и иного характера, прошла и другая моя деятельность по краткосрочной подмене оператора на гравиметрии. Стояла глубокая осень, и грунтовые дороги были совершенно непроезжими для обычного автотранспорта. В рейсе меня обслуживал закрепленный за мною грузовой вездеход ГАЗ-63, в кабине которого я, с прибором на коленях,



переезжал с точки на точку. Автомобиль медленно передвигался разъезженной дорожной колеей, наматывая на колеса «колбасы» жирного чернозема. Приехав на очередную точку, я вышел из кабины, провел необходимые наблюдения вблизи переднего колеса автомобиля и записал отсчет в журнал. Поднимаясь в кабину, я автоматически положил журнал на передний буфер машины. Уже через несколько минут, проехав с полкилометра, я вспомнил, что журнал-то остался лежать на открытом буфере. В то время все данные гравиметрии, по причине их обязательного учета при запусках баллистических ракет, были отнесены к категории закрытых. Даже на полевых гравиметрических журналах стоял гриф «секретно». Все страницы в них были прошиты, пронумерованы и закреплены сургучной печатью. По приезде на базу партии их обязательно сдавали на хранение в сейф. Я на минутку представил себе, что стало с журналом, если он при движении упал под колеса в грязь, и меня пробило холодным потом. Случившееся грозило долгим и грозным разбирательством с непредсказуемыми оргвыводами. С трудом развернувшись, мы поехали в обратную сторону. Но на этот раз судьба благоволила ко мне. Еще издали я увидел белую обложку журнала, который в целостности и сохранности лежал на дороге между двумя колеями. Вот так, на ровном месте, могла закончиться моя дальнейшая геологическая карьера.

Через год партия перебазировалась в с. Богдановка, что живописно расположилось на правом берегу р. Южный Буг. Участок полевых работ находился довольно далеко, в Доманевском р-не Николаевской обл. Запомнились интересные названия местных небольших сел — Мариновка, Царедаровка, возле которых были разбиты обширные плантации столового и винного винограда. Осенью во всех сельских магазинах за копейки можно было купить под капроновой пробкой полулитровую бутылку молодого холодного вина. Иногда возникала необходимость переправы на левый берег Буга, но моста через речку

в Богдановке не было, и мы тогда пользовались паромом, который приводили в движение по металлическому тросу вручную с помощью специальных деревянных колотушек. Надо отметить, что вся страна в то время (закат хрущевской эпохи) жила непросто. Карибский кризис в сопровождении иногда объявляемых по местному радио учебных воздушных тревог создавал ощущение чего-то тревожно неизвестного. Наш регион был наводнен военными строителями, которые создавали здесь южный оборонительный ракетный пояс шахтного базирования. В 1990-е годы под наблюдением иностранных специалистов он был полностью демонтирован. Осталась лишь одна музей-шахта у пгт Побужское, куда сейчас за плату гиды водят любопытствующих туристов. Очень трудно было устроить маленьких детей в ясли или детские садики. Ощущалась нехватка некоторых продуктов питания первой необходимости. Однако все тревоги и жизненные невзгоды компенсировались оптимизмом нашей молодости.

Основным направлением моей операторской деятельности в то время стала работа с градиентометром ГРБМ-2, которым тогда заменили малопроизводительные гравитационные вариометры Z-40 и S-20. Это была оригинальная конструкторская разработка, не имевшая аналогов за рубежом. В Украине аппаратура и методика проведения градиентометрических работ проходили испытания и внедрялись в производство под руководством известного гравиметриста из Москвы В. Э. Голомба в отряде тематической партии (начальник О. Р. Роман), база которой находилась недалеко от пгт Завалье, в райцентре Гайворон. После их завершения один из операторов отряда, Игорь Рувинский, был переведен к нам, став первым наблюдателем на градиентометрии в ПГП. Через год он перешел на работу в «Гипрогаз», а я стал продолжателем его дела в ПГП, но дружеская связь между нами сохранилась на всю жизнь. Проработал я на градиентометрии с некоторыми перерывами около 2 лет, подготовив за этот период еще нескольких

новых операторов. Мне нравилась такая работа своей независимостью от других бригад и возможностью оперативно, непосредственно в поле, оценивать поисковую перспективность получаемой информации. Это был мой первый неподдельный интерес к практическим результатам геологической интерпретации абстрактных геофизических данных. Он был замечен руководством партии (старший геофизик О. Б. Гинтов), и меня, по его рекомендации и с личного согласия, в 1965 г. перевели в партию интерпретационного бурения (ПИБ, начальник партии И. П. Кутышенко, старший геолог Г. Х. Димитров) на должность старшего техника-геофизика, а потом геофизика-интерпретатора.

В общих чертах, мои весьма ответственные обязанности состояли в разработке, на основе предварительной интерпретации геофизических данных, для каждой задаваемой скважины технико-геологического задания и инструментальном (с помощью магнитометра и буссоли) выносе на местность точек их заложения. В последующем следовало систематически в процессе бурения анализировать вещественный состав и физические свойства поднимаемого из скважин кернового материала и сравнивать полученные данные с результатами первичной интерпретации. В зависимости от степени их соответствия (с учетом также результатов электро- и гаммакаротажа), мною принималось решение о продолжении или прекращении бурения той или иной скважины. Одно время мне пришлось заниматься внедрением новой технологии подъема ориентированного керна, что было необходимым для решения задач структурной геологии. Мне приходилось подменять на время отпусков основного оператора на каротаже, моего многолетнего друга В. А. Кирышкина, для чего потребовалось освоить простейшие методики каротажа скважин станцией с полуавтоматической регистрацией электрических и радиоактивных параметров.

Партия часто меняла места своего базирования. Первомайск (Конецполь), Саврань, Хмельник, Малин, Ушомир, Черно-

вицы, Ставище — это лишь наиболее крупные населенные пункты, в которых мы организовывали полевые базы. Работники бурового отряда жили в передвижных вагончиках, а семейному составу ИТР каждый раз следовало искать наемные квартиры, устраивать куда-то маленьких детей. По этой причине моей жене пришлось перейти в менее мобильную геофизическую партию, с тех пор я уже постоянно работал вне семейной обстановки.

Не знаю, кто из больших начальников был инициатором организации ПИБ, но нельзя не отдать ему должное в понимании необходимости достоверного определения природы типовых геофизических аномалий путем проведения целенаправленного бурения и сопутствующего ему комплекса специализированных лабораторных исследований. Особенно на первых порах работе партии уделялось повышенное внимание. Достаточно сказать, что первая полученная трестом «вахтовка» на базе автобуса повышенной проходимости была направлена для перевозки сменных буровых бригад именно в ПИБ. С 1958 по 1970 г. работами ПИБ была изучена и определена природа нескольких сотен геофизических аномалий во всех регионах деятельности треста «Киевгеология». Полученные значимые результаты ее работ входили важной составной частью во многие геофизические и геологосъемочные отчеты, но рассмотрение собственных отчетов ПИБ на научно-технических советах (НТС) треста всегда проходило в ожесточенных спорах и редко получало единодушную оценку. Тому было несколько причин, которые не всегда имели геологическую подоплеку.

Дело в том, что отчеты ПИБ оценивались по двум критериям. Как для подразделения чисто технического характера, определяющее значение для оценки работы партии имели финансово-экономические показатели, основной из них — комплексная стоимость погонного метра бурения. По этому показателю в силу специфики стоящих перед ПИБ геологических задач, выполнение которых требовало наличия в ее составе вспомогательных

геофизической и геодезической служб и увеличенной проходки по коренным кристаллическим породам, партия не могла соревноваться с обычным бурением на съемке. Как результат — жесткая критика со стороны технико-экономических отделов треста. Вместе с тем не все было однозначно и с точки зрения оценки эффективности геологической деятельности ПИБ. Одни члены НТС считали, что единственным и достаточным критерием для прекращения бурения на геофизических аномалиях должно быть определение их геологической природы. При этом не принималось во внимание, что не всегда удается оперативно, непосредственно в поле, только по результатам визуального просмотра керна, принять окончательное решение о необходимости продолжения или прекращения бурения. Иногда приходилось подстраховываться и, может быть, несколько излишне бурить по породам высокой категории. Существовали различные мнения и о целесообразности дополнительных объемов бурения на аномалиях, потенциально представляющих поисковый интерес. Отмеченные обстоятельства, по-видимому, были главными аргументами в принятии руководством треста решения о прекращении деятельности ПИБ как самостоятельной производственной геологической структуры.

Вообще же, насколько мне известно, даже в масштабе всей страны по своему методическому предназначению и организационно-производственной структуре ПИБ представляла собой беспрецедентное геолого-геофизическое подразделение. Опыт ее деятельности, по моему мнению, до сих пор недостаточно оценен и может быть еще неоднократно востребован. О вкладе результатов деятельности ПИБ в разработку передовой на то время методики геолого-геофизического картирования кристаллических комплексов Украинского щита в Украине более детально изложено в статье [Ентин, 2007].

После расформирования ПИБ стационарная база ППП в Верхнячке была окончательно ликвидирована и вместе со все-

ми жилыми и хозяйственными постройками передана местной администрации. Высоквалифицированные сотрудники ПИБ были переведены в другие подразделения, но многие из них еще не раз, по случаю, встречаясь или собираясь вместе, с удовольствием вспоминали «дела минувших дней». Дальнейшая судьба моих коллег и товарищей по партии сложилась по-разному. И. П. Кутышенко долгое время возглавлял типографскую службу треста. Г. Х. Димитров ушел в академический институт, где защитил кандидатскую диссертацию. Старший геолог К. И. Гончаренко еще долгое время плодотворно работала в Комплексной геофизической партии. Прошли большую геодезическую школу в партии и рабочую закалку в полевых условиях топографы А. Е. Габур, А. П. Мычковский, Саткан Кадыргалиев. Геофизики каротажной партии В. А. Кирюшкин и В. Беккерей еще много лет трудились в составе Каротажной партии треста «Киевгеология», в становление которой они внесли неоценимый вклад. Не затерялись в дальнейшем и многие из буровых мастеров. Часть из них (Г. Кругляков, В. Скоробрещук) и водители (А. Талабанюк) перешли работать в ПГЭ. Старшие буровые мастера В. Козлов, Н. Беньковский, В. Шклярчук еще долго работали в ремонтных мастерских треста, передавая свой опыт молодым. Мне очень повезло, судьба распорядилась так, что я несколько лет работал рядом со всеми перечисленными и другими неупомянутыми сотрудниками ПИБ и с их помощью приобретал неоценимый опыт в понимании петрографии кристаллических комплексов Украинского щита и многомерности геолого-геофизических связей. Все это стало основой моей дальнейшей, надеюсь плодотворной, деятельности в геологии.

К сожалению, время течет неумолимо, и многих моих сотрудников по ПИБ уже нет в живых. И пусть эти заметки будут и им, внесшим на историческом пути становления Геологической службы Украины свою скромную лепту в ее достижения, своеобразной данью памяти.

По-видимому, начальство смогло положительно оценить результаты моей работы в ПИБ, и в 1968 г. мне предложили возглавить специализированный полевой отряд, структурно входивший в состав Тематической партии (начальник партии О. Б. Гинтов). К тому времени ее работами, по результатам анализа материалов старых площадных магнитных съемок, уже был создан требующий геологической проверки бурением банк перспективных на поиски силикатного никеля аномалий. Задача полевого отряда заключалась в восстановлении на местности положения переданных нам магнитных аномалий и их дополнительного изучения методами детальной магниторазведки и градиентометрии с последующей выдачей, уже на основе вновь полученных данных, прямых рекомендаций под поисковое бурение.

Местом базирования отряда и первого опыта административно-геологической деятельности стал уже ранее знакомый мне райцентр Голованевск. В ущерб своим прямым геолого-геофизическим интересам приходилось тратить много времени и усилий на решение различных бытовых и хозяйственных вопросов, начиная от поисков съемного жилья для сотрудников отряда, мест возможной заправки автотранспорта, запчастей к машинам, которые постоянно ломались, до организации ночной охраны их стоянки. С последней у меня связаны довольно неприятные воспоминания. Как-то осенью утром встретил меня водитель Г. Грищук и сообщил, что, собравшись на работу и выйдя на улицу, он обнаружил свой автомобиль вблизи дома, хотя накануне оставил машину на охраняемой стоянке. Мы вместе осмотрели машину. Все было внешне в порядке, хотя имелись явные следы ночной поездки. Мы опросили женщину-сторожа, но она сказала, что «собака вночі не гавкала, і я нічого не бачила». Было ясно, что сторожиха спокойно проспала всю ночь. Только мы решили идти в милицию, как она и сама к нам пожаловала. Подошли два милиционера и рассказали, что этой ночью в 15 км от Голованевска был ограблен сельский магазин

и что судя по характерному протекторному следу от редкого в местных хозяйствах вездехода ГАЗ-63 была использована наша машина. Забрав с собой нашего водителя, милиционеры уехали. Вернувшись на машине лишь поздним вечером, водитель рассказал, что по сохранившимся следам милиция нашла спрятанный в лесу товар из магазина и задержала нескольких человек. Позже был арестован и организатор преступления. Им оказался недавно вышедший из тюрьмы сын сторожихи нашей автостоянки.

Со следующего сезона наш отряд уже возглавил мой давний коллега по операторской работе на магниторазведке в ПГП Н. П. Прядун, к тому времени также закончивший институт, а я перешел на должность геофизика.

В 1969 г. база отряда была переведена в с. Перегоновка, которое расположено на берегу живописной, воспетой в украинских песнях р. Ятрань («Там де Ятрань круто в'ється, з під каміння б'є вода...»). Значительно расширились территория и объемы наших полевых исследований. Пришлось перейти на работу двумя летучими комплексными отрядами с постоянной сменой места базирования палаточных лагерей, что в целом продолжалось еще 2 года. Практически мы разделились на два самостоятельных отряда, каждый из которых действовал в пределах определенной нами же территории исследований. Я возглавил отряд, который в основном работал в пределах Винницкой, Хмельницкой и Житомирской областей, а заботой отряда Н. П. Прыдуна стали Кировоградская и Черкасская области. В состав отряда входили градиентометрическая, магнитная и топографическая бригады общим числом до полутора десятка людей, обслуживали их автомобили повышенной проходимости. Как правило, места под расположение полевого лагеря мы старались подбирать вблизи водоемов, недалеко от населенных пунктов. На одном пункте палаточного базирования удавалось пребывать не более 2—3 недель. В этих условиях определенной проблемой стала организация котлового

питания для коллектива отряда. Обычно все сотрудники партии заранее вносили некоторую сумму на закупку необходимых продуктов питания.



Редкая встреча в полевом лагере, с. Балановка Винницкой обл., 1970 г.

Слева направо: начальник ПИБ И. П. Кутышенко с сыном Тарасом; начальник тематической партии О. Б. Гинтов; водитель А. Талабанюк; начальник геофизического отряда Н. П. Прядун; геофизик отряда В. А. Ентин; старший геолог ПИБ К. И. Гончаренко; техник-геофизик В. А. Ивасюк (Махно); техник оператор по каротажу ПИБ В. Беккерей.

Надо признаться, что, по возможности, пользовались мы и «бесплатными» сельскохозяйственными дарами колхозных полей. Все заботы хозяйственно-бытового направления добровольно приняла на себя техник-геофизик Валентина Антоновна Ивасюк, в то время просто Валя. Дочь лесника из с. Ореховец Сквирского р-на Киевской обл., она благодаря полученным в детстве навыкам самостоятельной трудовой жизни полностью соответствовала условиям нашей работы. Помимо официальных обязанностей по обработке полевых материалов, Валя безвозмездно приняла на себя обязанности заготовителя продуктов и повара для всего полевого отряда. Тогда еще не было газовых баллонов, и ей приходилось рано вставать, чтобы на костре всему отряду приготовить завтрак и на вечер ужин. Днем, оставаясь одна в лагере, она была сторожем наших палаток и имущества. До самого выхода на пенсию Валя Ивасюк (теперь В. А. Махно) проработала непосредственно под моим руко-

водством, отвечая за обработку гравиметрической информации.

Не так благополучно, как у нас, сложилась поначалу быт в отряде Н. П. Прыдуна. Поварские обязанности попытались возложить на молодую женщину, Веру, которая приехала к нам еще в Перегоновку из Киева по рекомендации нашего шефа О. Б. Гинтова. В свое время я встречал Веру на автобусной остановке и поражаюсь необъятным размерам рюкзака по сравнению с ее небольшим ростом. Рюкзак она принципиально носила сама. В дополнение к рюкзаку у Веры была гитара, на которой она пыталась исполнять бардовские песни. С рюкзаком за спиной и гитарой в руках эта особа являла собой гротескно-киношный образ геолога и среди рабочих отряда получила прозвище «Вера-рюкзак». Ее гитарно-романтические представления о характере нашей работы развеялись при первом же выходе на геофизический профиль в составе рабочей топографической бригады. Там было совершенно не до песен под гитару. Не зная, куда определить присланную сотрудницу, Н. П. Прядун решил вменить ей поварские обязанности. Однако и на этом месте ее карьера не сложилась. Со слов Н. П. Прыдуна, он однажды неожиданно возвратился днем в палаточный лагерь и застал Веру готовящей на костре ужин в полном неглиже. Н. П. Прядун был брезгливым и тут же отстранил Веру от поварских обязанностей. Она недолго оставалась в отряде и вскоре уволилась.

Наладились бытовые проблемы в отряде Н. П. Прыдуна только после того, как за них взялась его жена техник-геофизик Мелания Леонидовна Прыдун (или просто Миля). Ежедневно выполняя магнитометрические маршруты, она «ухитрялась», возвратившись на базу, приготовить для всего отряда ужин и завтрак на утро, при этом обработать и результаты полевых измерений. Переведясь в 1973 г. вместе с О. Б. Гинтовым в Институт геофизики АН Украины, Миля Прыдун и здесь проявила свой организаторский (да и кулинарный) талант, работая до выхода на пенсию на-

чальником полевой тектонофизической экспедиции.

К чему я так подробно описал в общем-то незначительные заурядные обстоятельства повседневной геологической жизни и быта наших отрядов? Дело в том, что многие молодые люди выбирают свою будущую профессию по представлениям, далеким от ожидавших их повседневных реальностей, и, оказавшись не готовыми к ним, быстро разочаровываются в самой профессии.

За три сезона полевых работ нашими полевыми отрядами было изучено более сотни магнитных аномалий. Часть из них, признанных перспективными на поиски силикатного никеля, передавалась для проверки бурением в поисковую партию Побужской геолого-разведочной экспедиции (начальник Андрей Яковлевич Каневский) или в мою бывшую родную ПИБ. По результатам наших рекомендаций в Побужском рудном районе, у сел Свирнево, Крымка, Лашевка, Вербка было установлено несколько новых массивов серпентинитов с никеленосной корой выветривания; впервые в Украине был открыт новый ценный тип карбонат-магнетитовых руд. Исчерпывающий характер данной нами поисковой оценки на силикатные никелевые руды изученной части Украинского щита, как ни парадоксально, был подтвержден отсутствием в обследованных нами районах за последние 50 лет новых, сколь-нибудь значимых находок никеленосных массивов серпентинитов.

Время работы в ПИБ и в отряде по восстановлению магнитных аномалий было самым мобильным периодом всей моей дальнейшей деятельности. За 5 лет, не считая краткосрочных работ в Житомирской и Черкасской областях, я со своими коллегами прошел вдоль р. Южный Буг путь длиной более 300 км, от с. Богдановка на юго-востоке до с. Подольское на северо-западе. Тогда я впервые посетил с. Дьяковцы, откуда моя бабушка по матери (урожденная Прасковья Яковлевна Поляруш) выехала со своими родителями в конце XIX в. и где, по непроверенным слухам (по официаль-

ным документам — пропал без вести), был похоронен во время войны не сумевший выйти из окружения мой родной дядя по матери, капитан Красной Армии Владимир Владимирович Костин. Вообще интересно было ближе познакомиться с этим населенным пунктом, родиной известного советского писателя Михаила Стельмаха, приходившегося двоюродным племянником моей бабушке. По рассказам моей матери, работая до войны в селе учителем, он часто по приезду в Киев останавливался у них и целый вечер читал свои стихи. Тогда же я посетил местное кладбище и поговорил со встретившимся мне человеком. Он сказал, что жителей по фамилии Поляруш в селе до сих пор проживает немало, но по интересуемым меня вопросам он конкретно ничего не может сказать.

Работами в отряде по восстановлению магнитных аномалий фактически закончился 12-летний этап моего становления как геофизика, подготовленного к ведению самостоятельных работ широкого геолого-геофизического спектра. За это время я получил практические навыки работ на всех основных видах геофизической аппаратуры, освоил методику ведения полевых работ рудного направления, обработку и интерпретацию получаемых данных. Ценным для меня оказался опыт административно-хозяйственной деятельности, благодаря которому, с одной стороны, я понял, что это самостоятельный вид важных и трудных геологических работ, а с другой — пришел к заключению, что заниматься ею у меня душа не лежит. Мне выпала редкая удача для геофизика поработать в ПИБ и получить неоценимый опыт прямого знакомства с основными кристаллическими комплексами Украинского щита, проанализировать их связи с наблюдаемым характером геофизических полей. Без отрыва от производства я получил высшее образование и под руководством своих более опытных руководителей-геофизиков, прежде всего уже в то время начальника тематической партии О. Б. Гинтова, принял участие в написании нескольких отчетов и проектов.

В целом, как я считаю, курс «молодого бойца-геофизика» был успешно пройден за 12 лет. Исходя из личного опыта и общения со многими коллегами-геологами, я еще тогда установил для себя внутреннее правило, которое наилучшим образом в виде профессионального кредо сформулировал в интернетовской публикации один канадский геофизик (к сожалению, его фамилия не сохранилась в моей памяти): «Честный геофизик полагает, что в нем будут сомневаться, а бесчестная персона полагает, что ей будут доверять». Этот профессиональный девиз постоянно висит на стене за моим рабочем местом.

Важно, что и руководство экспедиции подобным образом оценило мою профессиональную подготовленность к самостоятельным работам. В результате наш полевой отряд в 1971 г. был преобразован в Каневскую геофизическую партию (начальник Н. П. Прядун, старший геофизик В. А. Ентин), напрямую структурно входившую в состав Киевской комплексной геофизической экспедиции треста «Киев-геология».

**Период активных самостоятельных работ советского периода.** Первым региональным объектом для нас были работы по подготовке геофизической основы под глубинное геологическое картирование территории Каневских дислокаций. Этот геологический регион неоднократно привлекал внимание многих исследователей особенностями структурно-тектонического строения и неоднозначной историей своего становления. Мне ранее никогда не доводилось бывать в районе наших предстоящих геофизических работ, получившем общесоюзную известность по ожесточенной битве за освобождение Киева на Букринском плацдарме. Ее следы в виде уже заплывших окопов, осколков боеприпасов и незахороненных останков погибших солдат мы встречали по всему участку работ. Первый полевой сезон партия базировалась в с. Степанцы, что в 20 км от г. Канева по дороге на г. Мироновку. Благодаря близости к исторически известному городу весь коллектив партии вскоре

смог побывать на Чернечей горе, где похоронен Кобзарь, и посетить могилу писателя А. Гайдара, погибшего в этих местах в годы Великой Отечественной войны. На второй сезон мы перебазировались в с. Ходоров, расположенное на высоком правом берегу р. Днепр. Сюда регулярно ходили речные катера «Ракета» и «Метеор». Ими было очень удобно и недорого плавать в Киев и обратно. Попав сюда, я был поражен экзотичным характером рельефа этой части правобережья р. Днепр — как бы опрокинутая на голову горная местность. Кажущаяся на удалении спокойно выровненной, она в действительности представляла собой лессовидное плато, изрезанное глубокими оврагами, с сохранившимися от поверхностной денудации остроконечными останцами.

В те годы началось заполнение Каневского водохранилища. Уходили под воду старинные прибрежные села Трактемиров, Малый Букрин, Григорьевка. Устья всех оврагов, открытых в сторону Днепра и заросших густыми зарослями кустарника и акаций, быстро затоплялись, что заставляло поспешно убежать и улетать обитавших там многочисленных кабанов и пернатых. В таких морфогеографических условиях было очень непросто выполнить предусмотренную в проекте площадную гравиразведку по строго выдержанной сети наблюдений. Было решено, что при развитии опорной сети в качестве транспортного средства необходимо применить вертолет. Как мне кажется, это был первый в Украине подобный опыт. В киевском аэропорту мы арендовали одну из первых моделей вертолетов — Ми-1м, которые начали использовать в народном хозяйстве.

В Сибири во время производственной практики нас в качестве транспортного средства обслуживала еще более ранняя модель — вертолет Ми-1, так что я уже кое-что знал об их технических возможностях и недостатках. Например, при частых запусках двигателя быстро садился аккумулятор, и тогда уже был необходим баллон со сжатым воздухом. В Украине пилоты в полет с собой баллон обычно не брали.

При возникновении в нем нужды к месту посадки вертолета автомобилем следовало доставлять механика с необходимым оборудованием. При отсутствии сотовой связи рабочий день был потерян. Поэтому во время посадки летчики старались не глушить вертолетный двигатель, что, в свою очередь, создавало вибрационные помехи при работе с гравиметрами. Приходилось сажать вертолет на определенном удалении от пункта наблюдений. Сложный рельеф района Каневских дислокаций вносил дополнительные объективные затруднения при подборе посадочных площадок. Тем не менее, хотя и не без приключений, мы успешно завершили необходимый цикл работ. В дальнейшем подобная методика развития опорных гравиметрических сетей, но уже с использованием более современных типов вертолетов, стала обычной практикой для всех гравиметрических партий нашей экспедиции.

Еще одной серьезной проблемой, возникшей из-за необычайно сложного характера рельефа местности, стали технические и экономические проблемы, связанные с необходимостью достижения высокой точности высотного обеспечения гравиметрической съемки традиционными топогеодезическими методами. В то время вся гравиразведка в нашей экспедиции в методическом отношении курировалась выходцем из знаменитого семейства российских адмиралов, геофизиком Георгием Сергеевичем Бутаковым. Несмотря на свой, как нам тогда казалось, уже преклонный возраст, он продолжал систематически посещать полевые отряды, требуя скрупулезного выполнения всех требований технической инструкции. Без преувеличения отмечу, что для нас, молодых геофизиков, он был легендарной личностью и пользовался непререкаемым авторитетом. К его приезду мы всегда готовились с особой тщательностью, просматривая всю полевую и камеральную документацию. При кажущейся внешней строгости в общении с нами он был вполне демократичен и никогда не старался показать свое превосходство. Приезжая в поле, наш куратор не

отказывался от участия в скромных послеобеденных «посиделках» и ночевал в конторе. Курил он, как говорится, безбоязненно. Во сне беспрерывно разговаривал и, по-видимому, вспоминая трагические моменты своей жизни, употреблял при этом не совсем культурные выражения. Очевидно, наиболее полная биографическая справка и характеристика личных качеств Г. С. Бутакова, сформировавшихся в непростых условиях его жизненного и трудового пути, как и вклад в развитие гравиметрических исследований в Украине, даны в статье, посвященной 100-летию со дня его рождения [Старостенко, 2009].

При таком внимании и жестком контроле со стороны кураторов экспедиции можно только представить, как мы старались не ударить лицом в грязь, выполняя первую серьезную самостоятельную работу. Особые проблемы нам доставляли работы по геодезическому обеспечению гравиметрической съемки. На первых порах для этой цели мы опробовали метод барометрического нивелирования, но в наших условиях площадной неустойчивости атмосферного давления он себя не оправдал. Не помню уже кто, возможно, старший геодезист нашей экспедиции С. С. Воробьев, предложил испробовать методику гидростатического нивелирования, недавно разработанную в Алма-Ате известным конструктором В. Скачковым. Это был первый и, как оказалось, единственный опыт успешного внедрения в практику гравиметрических работ в Украине подобной методики. Пришлось приложить немалые усилия, чтобы устранить мелкие конструкторские недоработки аппаратуры и подготовить операторов для работы с ней. В дальнейшем мы с успехом использовали эту методику нивелирования при проведении гравиметрических съемок в условиях сложного рельефа Приднестровья и Карпат. Как одного из активных участников внедрения этой технологии, в 1974 г. меня пригласили с сообщением на эту тему на всесоюзный семинар в Ленинград. Позже доклад был опубликован в ведомственном журнале «Геология и разведка недр». Впо-



следствии меня приглашали и в Ярунский техникум мелиорации, что на Житомирщине, для чтения лекций по методике барометрического и гидростатического нивелирования на курсах по подготовке для геологической службы геодезистов среднего звена.



Внедрение аппаратуры гидростатического нивелирования.

Каневские дислокации, 1972 г.

Слева направо: рабочий Каневской геофизической партии; старший геофизик партии — В. А. Ентин; старший геодезист-экспедиции — С. С. Воробьев (сидит); техник-геофизик — Л. Н. Майструк (Урбанская)

Как бы ни было затруднительно, но все-таки за два сезона мы успешно завершили полевые работы и приступили к написанию отчета. Это была первая для меня самостоятельная и такая ответственная работа. Я много старался, перечитал все прежние геологические публикации о районе работ. Защита отчета прошла хорошо, хотя и не без заслуженных и, на мой взгляд, субъективных замечаний. По результатам работ была опубликована научная статья о кинематике Ядлов-Трактемировского разлома, которая не потеряла своей актуальности до сих пор [Гинтов и др., 1986].

После успешного завершения отчетного цикла геофизических работ по району Каневских дислокаций коллектив Каневской партии был переориентирован на обслуживание производственных интересов Побужской и Правобережной геологических экспедиций треста «Киевгеология». По своей основной территориально-производственной деятельности была пе-

реименована в Побужскую и наша партия. Перебазировались мы в предыдущие места моей трудовой карьеры — Среднее Побужье и Приднестровье. Работы велись сразу по нескольким объектам под общим руководством начальника партии Н. П. Прядуна. Возросшие объемы работ и расширенный круг решаемых задач диктовали необходимость включения в проектную документацию, помимо традиционного комплекса наших работ, дополнительных геолого-геофизических исследований, таких как рудная сейсморазведка, геохимия, интерпретационное бурение скважин. В результате более информативным стало общее геологическое содержание отчетов.

Помимо работ регионального характера с середины 1970-х годов ППП выполняла многолетний цикл геолого-геофизических работ по изучению структурно-тектонического положения и перспективной оценке ресурсов рудопроявлений магнетитового железа Среднего Побужья. Интерес к ним возник еще ранее, когда, как отмечалось выше, здесь во время геолого-геофизических работ, связанных с поисками руд силикатного никеля, было открыто Молдовское проявление карбонат-магнетитовых руд. Новый виток интереса к изучению этих объектов был инициирован известным ученым-железорудником, доктором геолого-минералогических наук Михаилом Николаевичем Доброхотовым, в то время возглавлявшим Научно-редакционный совет (НРС) Геологической службы Украины. В сфере своего главного интереса он большое значение уделял геофизической информации. Ни одна из скважин не задавалась без детального рассмотрения наших геофизических рекомендаций. Позже, по инициативе Н. М. Доброхотова, я был введен в постоянный состав НРС. За десятилетие нами было изучено более десятка железорудных объектов, выполнена прогнозная оценка ресурсов магнетитового железа по геофизическим данным. В дальнейшем эти материалы легли в основу моей кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

Заканчивались полевые работы в Винницкой обл. на Вапнярской площади, когда от руководства экспедиции (начальник А. Л. Поливанчук) поступило указание срочно готовиться к геофизическим работам в Карпатах, в пределах так называемого Чивчинского кристаллического массива. Этот геологический регион Украины, расположенный в самой высокогорной части Карпат (Чивчинские горы), в верховьях междуречья Белый—Черный Черемош, относился к району обслуживания Львовской геофизической партии, которая административно была подчинена нашей экспедиции. Этой же партией был составлен проект на выполнение широкого комплекса детальных геофизических исследований, включая металлометрическую съемку, предназначенных в помощь поисковым работам на золото, которые уже велись на указанной территории Львовской геологической экспедицией. Лучше всех понимая все предстоящие организационно-производственные трудности работ на этой территории, начальник Львовской партии И. В. Гапак находил массу причин, чтобы не приступать к их

выполнению. Не знаю как, но ему удалось, в конце концов, уговорить начальника нашей экспедиции передать их выполнение другому низовому подразделению.

Выбор пал на нашу Побужскую партию. Возможно, свою роль здесь сыграл молодой, в основном не обремененный семьями состав нашей партии, способный легче переносить физические нагрузки и мобильные перемещения. К чести начальника партии Н. П. Прядуна, за согласие на выполнение работ он вытребовал для нас очень существенные организационно-производственные преференции. Была дана возможность доукомплектовать кадровый состав нашей партии нужными работниками и оборудованием из других подразделений экспедиции. По этой договоренности к нам на все время проведения полевых работ в Чивчинах были командированы специалисты среднего звена из Львовской и Волынской геофизических партий. Ведение геохимических работ (металлометрии) было поручено геологу Геохимической партии В. М. Самойловой. На должность начальника отряда был принят геофизик А. В. Федоров, который недавно



Утренний вылет на участок работ. Чивчины, 1975 г. Второй слева, с папкой в руках, начальник полевого отряда А. В. Федоров; садится в кабину вертолета техник-геодезист О. Урбанский; на переднем плане техник-геофизик В. Мельник

приехал в Украину и имел опыт работы в таежных районах Дальнего Востока. Чтобы облегчить ежедневные транспортировки наших полевых исполнителей из базового лагеря на участок работ и обратно, мы получили согласие на аренду вертолетов. Позже было получено разрешение и на выплату денежных доплат за высокогорный характер работ. Планировалось выполнить их в течение трех ближайших полевых сезонов, которые в условиях высокогорной части Карпат были весьма непродолжительными. Активно вести полевые работы можно было лишь с мая до середины октября.

Существовала еще одна, так и не преодоленная нами в дальнейшем, проблема. Участок работ располагался в пограничной зоне, где действовала пропускная система. Оформить необходимые документы было возможно только в местных органах власти при наличии командировочного удостоверения и паспорта с постоянной пропиской. Однако большая часть наших рабочих была из небольших населенных пунктов, власти которых не имели малейшего представления о порядке оформления подобных документов, да и не хотели в него вникать. Правильно оформленные пропуска были лишь у нескольких сотрудников, имевших постоянную прописку в Киеве, в том числе у меня. Выход из создавшейся ситуации мы нашли позже после переговоров с командиром местной погранзащиты капитаном Ивановым (не помню, к сожалению, его имя и отчество), который под свою ответственность согласился на присутствие в пограничной зоне наших людей при условии регулярной передачи ему заверенных списков состава нашего отряда. Но эти проблемы еще были впереди, а сейчас надо было срочно решать самые первые организационные вопросы.

Вдвоем с Н. П. Прядунюком на автомобиле (я был и за водителя) мы выехали на участок работ в мае. Первым целевым пунктом нашей поездки стал райцентр Путила Черновицкой обл., где мы представились местным властям и получили некоторые полезные советы по нашему устройству.

Нам порекомендовали искать базу отряда в поселке лесозаготовителей Перкалаб, расположенном в верховьях р. Белый Черемош, рядом с основным участком наших работ. Добравшись по серпантину горных дорог в Перкалаб, мы зашли в поселковый совет и рассказали о цели нашего прибытия. Получив согласие со стороны совета, мы приступили к разрешению своих первоочередных организационных забот. На окраине Перкалаба, у слияния р. Белый Черемош с его левым притоком Москатин, среди молодой поросли елок, подыскали удобное живописное место под палаточный лагерь (впоследствии лагерь перебазирували в бассейн р. Черный Черемош). Договорились также об условиях нашего питания в рабочей столовой, куда пообещали доставлять вертолетом из райцентра необходимые дополнительные продукты.

Вернувшись на «Большую землю», мы сразу приступили к переброске автотранспортом личного состава работников и необходимого оборудования на участок работ. Не буду останавливаться на всех перипетиях карпатского периода нашей деятельности, было все — конфликты с пограничниками, блуждания в тумане по горам, жуткие грозовые ливни на «полонинах», но и неповторимая краса здешних мест, густые заросли дикой малины, из которой все варили варенье, и поляны белых грибов. Частично все это уже описано в статье [Ентин, 2006].

В памяти остались яркие впечатления от самобытной жизни местного населения, которая, конечно, ныне изменилась коренным образом. Поселок представлял собой пару десятков деревянных хат, хаотично разбросанных в узкой долине гор, в месте слияния трех горных потоков — р. Белый Черемош, его левого притока Москатин и правого — Солонцовка. Проживало в Перкалабе, как и в близрасположенных поселках, немногочисленное население в основном старшего возраста. Постоянной работы здесь почти не было, и молодые парни уже тогда практически все выезжали на заработки, но девушки, в отличие от нынешних времен, еще оставались дома. Две

местные Марички были приняты к нам на работу. Потом одна из них уехала с нами и впоследствии вышла замуж за инженера-оператора нашей партии Славу Мацюка. Оставшиеся в поселках взрослые «гуцулы» занимались сплавом леса вниз по Белому Черемошу на лесокомбинат, про который я, как, наверно, почти все население страны, имел представление только по живописным лубочного вида клипам к песням С. Ротару, когда лесорубы с перьями на шляпах лихо несутся по реке, пригибаясь под ажурными мостиками.

В настоящее время такой вид сплава полностью запрещен вследствие губительного влияния на окружающую среду (выбита почти вся речная форель, размывались русло и берега реки) и больших потерь деловой древесины. Когда мы с Н. П. Прядуном ехали по дороге, проложенной вдоль берега Белого Черемоша, я не мог понять, каким образом по этой мелководной речке, с частыми крутыми русловыми изгибами можно сплавлять плоты. Думаю, что читателю интересно узнать действительную картину былой технологии сплава, которую мы наблюдали здесь в течение двух сезонов. Этой работой занимались комплексные бригады, которые лесовозами свозили из окружающих поселков в Перкалаб, обычно в воскресенье вечером. В понедельник, уже после обеда, бригада, в которой все ее члены имели четко распределенные обязанности, приступала к работе. Кто-то мотопилами валил растущий горный лес (местный вид ели — смерека), другие обрезали боковые ветки и сучья, ошкуривали кору, а третьи тракторами стягивали уже готовые к сплаву бревна в искусственную речную запруду на р. Белый Черемош (местное название «кляуза»), которая находилась в 3 км выше по течению от поселка. В запруде в течение недели накапливался необходимый запас воды. В торцах сброшенных в воду бревен просверливались отверстия, через которые пропускали стальные канаты, с их помощью бревна вязали в отдельные плоты, а последние объединяли в единую сборку из 4—5 плотов. Потом на лесоком-

бинате эти торцевые концы отрезали, и они шли в непромышленные отходы. Процесс валки леса и сборки плотов длился 3 дня. В четверг утром открывали затворы плотины, и поток воды устремлялся вниз. Через час-полтора, еще на высокой волне, из «кляузы» по специальному деревянному желобу отправлялись вниз по реке и плоты. Управлял ими «спецназ» лесосплавной бригады — плотогоны. Без песен и перьев на шляпах, с железными кошками на сапогах, они ловко бегали по связке плотов. Требовалось немалое искусство, чтобы плоты не слетели с высокой воды и, не дай Бог, сели на мель или не разбились на крутых поворотах реки. Несколько часов плоты неслись вниз до слияния Белого и Черного Черемошей, где лес сдавали на Вижницкий лесокомбинат. В пятницу, до обеда, оставшиеся члены бригады убрали участок, обедали с благодарением Богу и отправлялись по домам до следующего заезда.

По объективным причинам результаты наших работ не привели к открытию коренных золоторудных проявлений, однако получили высокую оценку со стороны НТС треста и геологов Львовской экспедиции.

В конце 1970-х годов произошло слияние Побужской, Правобережной и Кировоградской геофизических партий, и хотя общее руководство вновь образованной производственной структуры осталось за нами, будущую свою деятельность мы уже продолжили под брендом Правобережной геофизической партии. В ее коллектив влились опытные и хорошо известные широкому кругу специалистов геофизики Б. С. Германов, К. Д. Столяренко, Л. П. Шаган, Р. И. Милютин и другие, с которыми в дальнейшем я много и плодотворно сотрудничал. Еще более расширилась сфера деятельности нашей партии. Я уже не успевал совмещать свое участие в полевых и камеральных работах. Помимо этого приходилось много отвлекаться на подготовку диссертации в Институте геофизики им. С. И. Субботина АН Украины, которую я защитил в декабре 1987 г. Пришлось почти полностью сосредоточиться

на отчетных делах. Одной из работ этого периода стал отчет по результатам геофизических исследований группы Фрунзовских магнитных аномалий высокой интенсивности, которым завершалась оценка ресурсов магнетитового железа юга Украины. За рецензией на эту работу я обратился к упомянутой выше Зинаиде Александровне Крутиховской, доктору геолого-минералогических наук, сотруднику Института геофизики АН Украины. В мою бытность студентом КГРТ она вела курс магниторазведки и руководила моим дипломным проектированием. Мне, как ее бывшему ученику, было лестно услышать от нее, много лет посвятившей изучению железорудных месторождений на Полтавщине, высокую оценку нашей работы. В то время Зинаида Александровна уже тяжело болела, принимала меня дома и, к большому сожалению, вскоре ушла из жизни.

Это было время нашего тесного и плодотворного сотрудничества с геологической элитой треста — геологами-съемщиками Г. Г. Виноградовым, А. А. Воробьем, А. Я. Каневским, Р. Н. Довганем, П. Ф. Брацлавским, В. С. Костюченко, В. В. Зюльце (называю только некоторых из тех, с которыми работал вместе в поле и знаком лично) и многими другими. Все отчеты по геологическим региональным работам проходили ответственный этап апробации в НРС, в работе которого я тоже принимал постоянное участие. Помимо прочего, это была прекрасная возможность перенимать опыт у всех лучших геологов-геофизиков Украины. Я близко познакомился с плеядой геологов-ученых, которые курировали все съемочные работы в Украине. В этот период наибольшее влияние на меня своей профессиональной эрудицией и памятью оказал бывший начальник отдела геологической съемки Министерства геологии Украины Вячеслав Акимович Великанов. Позже он неоднократно привлекал меня для участия в разработке ведомственных инструкций и методических указаний. Как-то из разговора с ним я узнал, что во время войны мы оба находились в эвакуации почти рядом в

Саратовской обл. Благодаря общности наших жизненных взглядов и геологических интересов мы быстро стали и остаемся близкими товарищами.

В 1980-х годах Правобережная геофизическая партия в основном продолжала вести комплексные геофизические съемки на территории левобережной части Приднестровья, характер рельефа которой напоминал нам и Каневские дислокации, и Карпаты. Через мост в Могилев-Подольском или паромную переправу в Ямполье мы иногда переправлялись через Днестр в Молдавию, где можно было достаточно свободно купить на подарки в Киев вкусные конфеты из заспиртованных ягод в шоколаде, пользовавшееся популярностью вино-вермут «Букет Молдавии». «Доставали» в Молдавии отпечатанную на плохой серой бумаге дефицитную на то время художественную литературу. Непривычно было видеть бесконечные, уже тогда на низких подвоях, фруктовые сады, длинные ряды легких навесов с подвешенными для сушки связками табачных листьев. При внешнем благополучии сельское население этих районов Молдавии было заметно беднее украинских селян. На их фоне выделялись своей помпезностью цыганские дома, со сплошь расписанными какой-то странной аляповатой живописью воротами.

В середине 1980-х годов доселе многолетний начальник нашей партии Н.П. Прядун возглавил Волынскую геофизическую партию, в ведении которой сохранилась единственная в экспедиции стационарная база в с. Турчинка Житомирской обл. Руководителем же Правобережной геофизической партии после Н. П. Прудына стал наш начальник отряда Н. П. Шидловский. При нем продолжился процесс укрупнения партии, куда на правах отдельного отряда вошла бывшая Электроразведочная партия (ответственный исполнитель электроразведочных работ старший геофизик В. И. Трегубенко). За эти годы при непосредственном участии сотрудников Правобережной геофизической партии было получено много новых важных геологических

материалов поискового значения. Так, на Приднестровье были установлены новые апатитсодержащие Троповский, Голосковский и другие массивы базитов. Впервые в Деражнянском р-не Хмельницкой обл. закартированы не известные здесь ранее и перспективные на поиски рудной минерализации массивы пород ультраосновного состава (Кармалюковский, Зяньковецкий и др.). В Черкасской обл. было открыто перспективное Носачевское рудопоявление ильменита, а вблизи г. Гайворон Кировоградской обл. — Степковское рудопоявление графита. Мы принимали участие в изучении геологического строения и оценке поисковой перспективности первого в пределах Украинского щита Клинцовского коренного месторождения золота. Одновременно с этим совместно с Электроразведочной партией были проведены опытно-методические комплексные геофизические исследования на нефтяных структурах Днепровско-Донецкой впадины. В 1988 г. с целью изучения особенностей структурно-тектонического строения Чернобыльской зоны отчуждения сводным отрядом нашей и Сейсмической партий были проведены маршрутные комплексные геофизические исследования.

Отрядом электроразведки в период с 1986 по 1990 г. были успешно выполнены исследования по изучению методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) глубинного строения земной коры вдоль трансрегионального профиля Украина—Тюмень. Тогда же этот отряд, по заданию Кабинета Министров СССР, принял участие в научно-прогностических работах в районе катастрофического Спитакского землетрясения в Армении. С такой, без ложной скромности, высокой геологической эффективностью наших работ Правобережная геофизическая партия встретила конец эпохи своего советского существования.

**Геофизические работы постсоветского периода.** С начала 1990-х годов, с приобретением независимости Украины, стали резко сокращаться бюджетные ассигнования на все виды геологических работ. Вместе с

тем набирал обороты процесс сокращения исполнительного штата геофизической службы при одновременном объединении всех низовых геофизических единиц в единое базовое подразделение, которое сохранилось за Правобережной геофизической партией. В ее состав были включены специализированные Аэромагнитная и Сейсмическая партии, а несколько позже и все остальные, включая Каротажную, Полесскую и Волынскую геофизические партии нашей экспедиции. Вскоре геофизическая экспедиция как самостоятельная производственно-административная единица была упразднена, а весь объединенный сложный конгломерат геофизических партий самой различной специализации под названием Центр геофизических исследований был переподчинен напрямую тресту «Киевгеология». Его директором стал бывший начальник Полесской геофизической партии Иван Алексеевич Качан, а я сохранил за собою должность главного геофизика.

1990-е годы запомнились общим развалом геологической службы Украины, что не могло не затронуть и трест «Киевгеология». Началась неоправданная кадровая чехарда в руководстве треста. Образовалась огромная задолженность по зарплате сотрудникам партии, приведшая к массовому увольнению специалистов молодого и среднего возраста. Постсоветский «демократизм» чуть ли не затронул и мою личную карьерную судьбу. Возможно, читатель, знакомый с трудовыми биографиями многих геологов советского времени, смог уже заметить, почему я, специалист с достаточно успешной служебной карьерой, так ни разу и не побывал за границей. Как теперь выражается молодежь, «если ты такой умный, то почему такой бедный?». Действительно многие мои коллеги по работе выезжали (бывало и неоднократно) в заграничные служебные командировки, где можно было существенно подзаработать. Я понимал, что многое зависело от благосклонности руководства, не лишними были и личные связи с ответственными сотрудниками московского треста «За-

грангеология», в ведении которого были все подобные работы. Я не очень задумывался над этой проблемой, пока как-то не узнал, что наша экспедиция направляет на поиски железных руд в Иран большую группу геофизиков, в том числе не имевших ни малейшего опыта работы в этом направлении. Я же, который в то время уже 10 лет успешно вел поиски железных руд на всей территории деятельности треста «Киевгеология», остаюсь за бортом данного мероприятия. Признаюсь, меня это задело, и я обратился за разъяснениями к начальнику производственного отдела экспедиции Л. И. Орапу. Ответ был мало-вразумительный, с намеками на мой, выражаясь геологическими терминами, вроде бы недостаточно благонадежный для страны генезис. Было обидно, но что было, то было, и теперь я спокойно оцениваю прошедшие события. Больше я к этой теме никогда не возвращался. Но вот настала долгожданная «демократизация» общества, и наш начальник экспедиции В. Д. Гейко, с которым мы сотрудничали в бытность его работы начальником партии в ПГЭ, решил посодействовать моей командировке в Северную Корею. Там уже работала большая группа наших геофизиков и специалистов из института «Атомпроект», они вели инженерные изыскания, предшествовавшие строительству атомной электростанции. Мне успели сделать заграничный паспорт и поставить в нее въездную визу, когда исчезла сама страна СССР. На память об этом событии у меня сохранился только бывший советский красный заграничный паспорт. Я же так и не смог за всю жизнь побывать за границей. Этот факт я теперь с чистой совестью и полной ответственностью всегда отмечаю в заполняемых мною время от времени анкетах.

Из лично интересных для меня событий того времени, не связанных непосредственно с моей профессиональной деятельностью, стали посещение шахты на Клинцовском месторождении золота и участие в составе комиссии Геолконтроля в работе по приемке геолого-геофизических материалов в одной из партий Кировской

экспедиции. Хочу несколько подробнее остановиться на последнем. Это был, кажется, 1992 или 1993 год. Наша комиссия в составе трех человек (я, Г. Г. Лисицкий, третьего не помню) вместе с представителем геологического руководства Кировской экспедиции приехали в пгт Смолино (бывшее с. Березовка) Кировоградской обл., названного в честь первооткрывателя крупного месторождения урана, Героя Социалистического труда Николая Смолина. Здесь функционировала шахта по добыче урана, которая в СССР относилась к системе Министерства среднего машиностроения. Работали на ней обычные гражданские шахтеры с 6-часовым рабочим днем, а не какие-то, по обывательскому мнению, заключенные. Снабжение города осуществлялось по высшим стандартам этого особого статуса отрасли производства. У местного населения по статистическим данным в личном пользовании находилось самое большое в стране количество легковых автомашин на 1000 жителей. Даже в трудные годы перестройки в магазинах города еще был неплохой выбор промышленных и продовольственных товаров. Некоторые остатки былого изобилия сохранились на время нашего посещения. Однако в то время шахтерский труд перестал быть престижным. Бытовало мнение, что урановая промышленность вообще не нужна Украине, но время все расставляет по своим местам. Последующие события вокруг урановой шахты показали ошибочность первоначального мнения правительства Украины о ненужности атомной энергетики. В августе 2008 г., в присутствии на то время премьера правительства Украины Ю. В. Тимошенко, на поверхность была поднята первая вагонетка руды, а в июне 2011 г. на Новоконстантиновской шахте началась ее опытно-промышленная добыча. В октябре 2012 г. в Смолино, по сообщениям прессы, состоялась закладка первого камня под основание будущего завода по производству ядерного топлива. При этом присутствовали на то время премьер-министр Украины Н. Я. Азаров и директор «Росатома» С. Кириенко. Оче-

видно, что до завершения строительства того проекта еще должно пройти много времени. В октябре 2016 г. уже была добыта миллионная тонна руды. Сейчас идут переговоры с китайскими инвесторами о переходе на промышленную добычу руды, которая должна на 100 % обеспечить атомную энергетику Украины.

Несмотря на сложившееся трудное экономическое положение всей геологической службы Украины, благодаря запасу кадрового и интеллектуального потенциала геофизики треста в этот период продолжали эффективно действовать в помощь геологическим работам съемочного и поискового (алмазы, золото) направлений. По их результатам на северо-западе Украинского щита выявлены потенциально алмазоносные дайковые образования (В. В. Дроздецкий), эксклюзивные по своим геофизическим параметрам Песчанская железо-магнетитовая структура трубчатого типа и Ждановское полиметаллическое проявление (В. А. Ентин). Я уже писал о некоторых случайных и закономерных обстоятельствах, которые сопутствовали последним двум геологическим открытиям [Ентин, 2003]. Сейчас же хочется поделиться с читателем некоторыми другими мыслями по поводу прошедших событий.

Песчанская структура, установленная по геофизическим данным на окраине с. Песчанка Котовского р-на Одесской обл., сразу привлекла мое повышенное внимание из-за своей, ранее нигде не наблюдавшейся, сверхвысокой интенсивности проявления в магнитном поле, в полтора раза превышающей нормальное поле Земли. Было понятно, что столь высокая амплитуда магнитной аномалии может быть обусловлена только магнетитсодержащими породами. Однако при такой высокой интенсивности удивляли небольшие размеры аномалии (400×200 м) и отсутствие геофизических признаков быстрого выклинивания объекта, что могло свидетельствовать о необычности его геологической природы. Вместе с тем небольшая площадь аномального объекта ставила под сомнение его промышленную перспективу.

Меня обуревало здоровое любопытство, и, оценив все обстоятельства, я все-таки решил настоять на предусмотренном для таких целей интерпретационном бурении скважин. Мое предложение не встретило одобрения со стороны руководства треста (генеральный директор В. С. Металиди). Как мне было сказано: «Украину железной рудой не удивить». Я вспомнил тогда еще одну подобную сентенцию, услышанную на одном из заседаний НТС треста, правда, не в мой адрес: «Прекратите удовлетворять свое любопытство за государственный счет». Я тогда в душе не согласился с таким ценным указанием, полагая, что именно индивидуально проявленное любопытство геолога-геофизика является тем стержнем, который в геологии объединяет производственное начало и научные интересы.

Я решил все-таки добиться своего и обратился за помощью к руководителю Геологического комитета Украины того времени Д. С. Гурскому, с которым был знаком еще со времени его работы в ПГЭ. После его одобрения моего предложения на Песчанской структуре были пробурены две скважины, которые подтвердили связь магнитной аномалии со столбообразным штоком магнетитовых руд большой вертикальной мощности. Полученные результаты были с интересом восприняты в научной среде. После проведения дополнительных лабораторных петролого-минералогических исследований по этой теме было опубликовано несколько публикаций в научных журналах. Объектом заинтересовался частный инвестор, и наш трест в эти тяжелые годы получил дополнительные небюджетные ассигнования, так что потери от моего любопытства были с лихвой финансово компенсированы. Однако многие вопросы генезиса этого необычного по своей структуре и вещественному составу геологического объекта остаются еще полностью не изученными и ждут дальнейшего разрешения.

Во многом сходным по геологическому значению с Песчанским объектом стало открытие по геофизическим данным



у с. Ждановка Хмельникского р-на Винницкой обл. комплексного проявления урана, благородных металлов, включая впервые найденного в Украине в коренном залегании платиносодержащего минерала спирилита, самородной меди и др. Особую экзотику этому проявлению придавала приуроченность столь высоких концентраций урана к нетипичным для таких случаев породам ультраосновного состава. Известно, что весь Хмельникский р-н славится своими лечебными водами, которые несут в себе радон — конечный газообразный продукт распада урана. Известны здесь и небольшие урансодержащие проявления. Так, еще в период строительства Хмельникского санатория радоновых вод в 1965 г. я работал в партии интерпретационного бурения — изучалась Соколовская тектоническая зона, сопровождаемая обильной урановой минерализацией. И хотя открытие Ждановского рудопроявления имело больше научный, чем промышленный интерес, оно служит еще одним дополнительным аргументом в пользу перспективности этой площади на уран и постановки здесь более обстоятельных поисковых работ.

Определенное улучшение общей экономической ситуации в нашей отрасли произошло после принятия правительством, по предложению директора Геологической службы Украины Д. С. Гурского, программы по ее развитию до 2030 г. Кроме прочего, программой предусматривалось геологическое доизучение территории Украины в масштабе 1:200 000 (ГДП-200) с опережающей подготовкой геофизических основ. В короткий период всплеска деловой активности в нулевых годах ЦГИ продолжал вести договорные геофизические работы по обеспечению подземными трещинными водами некоторых населенных пунктов и промышленных предприятий. Тогда же с частными инвесторами было заключено и выполнено несколько договоров на проведение геофизических работ с целью поисков рудного и нерудного сырья (хромиты, железо, медные руды, плавиковый шпат, цементное сырье,

нефть) в Украине и за границей. По договору с Институтом геодезии и картографии Управления Госгеокадастра при Министерстве агропромполитики Украины в процессе проводимых этой организацией работ по международной сертификации Бориспольского аэропорта на площади его ближайшего окружения выполнена детальная гравиметрическая съемка, подготовлены гравиметрические данные для перехода Украины на общеевропейскую геодезическую систему координат. По договору с Государственным производственным предприятием «Трансгаз» проведены специальные наблюдения напряженности поля силы тяжести на площадках перекачивающих насосных станций магистральных газопроводов Украины. Тогда же в ЦГИ начались и продолжаются до сих пор работы по созданию и систематическому пополнению автоматизированного банка гравиметрических, магнитных и каротажных данных.

Впервые в Украине в ЦГИ, применительно к нуждам геодезического обеспечения разных видов геолого-геофизических работ, была адаптирована и внедрена в производство высокотехнологическая спутниковая радионавигационная система GPS, что, помимо прочего, дало возможность на договорных началах принять участие в государственной программе по созданию кадастра земельных сельскохозяйственных угодий (начальник топогеодезического отряда Н. В. Герасименко).

В постсоветский период коллектив ЦГИ подготовил несколько методических инструкций, закрепляющих и регламентирующих ведение геофизических и геодезических работ на разных стадиях ведения геологической съемки. Специалисты-геофизики ЦГИ приняли активное участие в подготовке к изданию новой Тектонической карты Украины масштаба 1:1 000 000 (главные редакторы Д. С. Гурский, С. С. Круглов, [Тектонічна..., 2007]). К Всемирному геологическому конгрессу в Австралии в 2012 г. было подготовлено эксклюзивное издание атласа «Природные геофизические феномены Украины»

[Ентин, 2012], в который вошли геофизические аномалии с уникальными параметрами, многие из них были открыты и изучены геофизиками треста «Киевгеология». Имея больше свободного времени, я стал активнее заниматься научно-популярными журнальными публикациями. В этом отношении я особо выделяю ранее нигде не публиковавшуюся «Карту абсолютных значений силы тяжести на уровне дневной поверхности Украины», которая была создана и подготовлена к изданию в соавторстве с группой сотрудников Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины и Института геодезии и картографии [Ентин и др., 2015б].

Однако процесс деструкции всей геологической службы Украины, а вместе с нею и ее геофизических структур, к сожалению, продолжает нарастать. Геолого-геофизические работы ввиду недостаточного и неритмичного их финансирования в последние годы ведутся крайне медленно. Продолжительность работ по одному объекту может составлять более 10 лет. О каком профессиональном росте молодого специалиста при таком темпе работ может идти речь? Оставшиеся в штате в основном специалисты пенсионного возраста задействованы на производстве 1—2 дня в неделю. Отсутствие государственных трансфертов на приобретение новой аппаратуры и оборудования, без которых невозможно нормальное функционирование геофизической службы, привело к потере целых направлений исследований, таких как сейсморазведка, МТЗ, многие виды каротажа. Закрыта лаборатория по изучению физических свойств горных пород. По причине отсутствия государственных заказов на грани закрытия находится аэромагнитный отряд.

В таком кризисном состоянии всей геологической отрасли Украины мы встречаем 100-летний юбилей ее образования. Для профессионального и технического подъема отрасли на современный уровень потребуются колоссальные материальные вложения и подготовка нового поколения квалифицированных кадров, что возмож-

но лишь при государственном понимании важности и необходимости ее нормального функционирования. Но это уже забота не нашего поколения. Мы без особых материальных стимулов честно работали на всех участках порученной нам работы, и не наша вина, что случилось так, как случилось.

**Геологическая эффективность геофизической службы треста за последние 60 лет.** Завершая описание пройденного мною в составе геофизических партий треста «Киевгеология» почти 60-летнего профессионального трудового пути, в преддверии 100-летнего юбилея Геологической службы Украины хочется перечислить известные мне главные плоды деятельности всей геофизической службы треста «Киевгеология», некоторые из них упомянуты выше, как результаты деятельности партий при моем непосредственном участии. Во многом они помогли тресту удерживать одно из ведущих мест на самых различных направлениях геолого-геофизической деятельности не только на республиканском, но и на союзном уровне. Некоторые из этих достижений до сих пор не потеряли актуальности и ждут своего последующего развития.

Период максимального развития и успехов деятельности геофизической службы треста «Киевгеология» пришелся на период с середины 1960-х до середины 1980-х годов. В ее успешном геологическом становлении большую роль сыграли геофизики старшего поколения В. И. Андрух, А. Т. Ващенко, О. Г. Яненко, А. Л. Поливанчук, В. Г. Смирнов, Г. С. Бутаков, В. М. Егоров и другие. Благодаря их перспективному видению будущего геофизических исследований постоянно шел активный процесс кадрового пополнения и обновления современными образцами парка геофизической аппаратуры и геодезического оборудования низовых производственных коллективов. Комплекс геофизических исследований был расширен за счет включения в него рудной сейсморазведки, новых методов электроразведки, скважинной геофизики (радиоволнового просвечива-

ния) и аэромагниторазведки. Одними из первых в СССР в широкую практику полевых геофизических работ треста «Киевгеология» были внедрены высокопроизводительные градиентометры, технологии гидростатического и барометрического нивелирования. Эти организационные мероприятия позволили существенно расширить и удешевить круг эффективно решаемых геологических задач, ускорить проведение гравиметрических съемок на всей территории Украины. Так, на Володарском рудном поле с успехом были проведены работы по поиску пьезокварцевого сырья, за что большая группа специалистов треста «Киевгеология», в том числе начальник отряда скважинной геофизики Михаил Иванович Майко, стали лауреатами Государственной премии СССР. Позже, как упоминалось выше, благодаря высокой технической и кадровой оснащенности Правобережной геофизической партии, были успешно выполнены электроразведочные исследования союзного значения по изучению глубинного строения земной коры вдоль трансрегионального профиля Украина—Тюмень, а также работы в районе Спитакского землетрясения (Армения).

В структуре треста была организована и успешно функционировала одна из первых в Украине Сейсморазведочная партия (начальники Л. М. Шимкив, В. М. Сердюк) рудного направления. Результаты ее деятельности на территории ответственности треста внесли существенный вклад в решение самых различных задач поискового и общего геологического направлений.

По инициативе группы геофизиков (Г. С. Бутаков, В. Г. Смирнов, И. Г. Овруцкий, В. А. Кажурин и др.) и при их активном участии в тресте на базе больших электронных машин был организован центр автоматизированной обработки геолого-геофизической информации.

Большое научно-прикладное значение для всей Украины имели и сохраняют до сих пор результаты работ по изучению магнитного поля ее территории, которые проводились в течение многих лет Аэромагнитной партией под руководством

геофизиков А. В. Тесленко, В. А. Ищенко, Т. С. Нечаевой и др.

Среди важных методических достижений геофизиков треста «Киевгеология» стали разработка и внедрение в общепринятую практику всех геологосъемочных партий и экспедиций Украины методики структурно-геофизического картирования основных петрофизических комплексов кристаллических пород, которая в дальнейшем получила общесоюзное признание. Начальные шаги в разработке этой методики были сделаны в работах известного геофизика Г. К. Кужелова, в то время сотрудника Киевской экспедиции УкрНИГРИ, который обосновал возможность картирования некоторых кристаллических комплексов по характеру наблюдаемого аномального магнитного поля. Продолжателем идеи Г. К. Кужелова, но уже на основе комплексного анализа особенностей внутренней структуры аномального магнитного и гравитационного полей масштаба 1:50 000 и крупнее в сочетании с глубокой систематизацией данных о физических свойствах горных пород, стал один из ведущих геофизиков треста «Киевгеология» в 1960—1970 гг. О. Б. Гинтов.

Успешному внедрению разработанной методики геолого-геофизического картирования во многом способствовали результаты деятельности совершенно неординарного по структуре геолого-геофизического подразделения — специализированной партии интерпретационного бурения. Насколько известно, ни до, ни после этого геологических структур такой направленности в Украине, а может быть и в СССР, не существовало. Опыт и результаты ее работы, по нашему мнению, остаются недостаточно оцененными и могут быть еще неоднократно востребованными. Полученные данные заверки природы геофизических аномалий полностью подтвердили правомочность основных принципов структурно-геофизического картирования. Под влиянием взглядов Г. К. Кужелова, О. Б. Гинтова в тресте «Киевгеология» сформировалась школа геофизиков-структурщиков, из числа

которых назовем несколько наиболее ярких представителей старшего поколения — В. И. Сержин, Л. П. Шаган, К. Д. Столяренко, Б. С. Германов, О. Т. Дубовецкий, Б. Н. Середа, О. Г. Яненко. Впервые внедренная в практику геологической съемки треста «Киевгеология», эта методика получила признание и в других подобных организациях Украины. Как это не покажется нескромным, именно нам в ЦГИ в конце XX в. удалось как бы соединить временные вехи на долгом пути становления методики геолого-геофизического картирования, закрепив основные методические наработки этого прогрессивного направления в макетных построениях и соответствующих требованиях в инструкциях по проведению геологических съемок.

Отдельно следует отметить немаловажное методическое значение работ, которые в тресте «Киевгеология» проводились в разные годы под руководством В. Ручко, М. Н. Байсаровича, М. И. Майко, А. С. Шмарьяна и других в Комплексной геофизической партии. Была создана авторитетная школа украинских геофизиков-гидрогеологов, разработан и в широких масштабах внедрен в производство рациональный комплекс геофизических исследований, направленных на поиски трещинных вод в кристаллическом фундаменте. Результаты деятельности этого структурного подразделения во многом способствовали достоверной оценке прогнозных ресурсов подземных вод на обширных территориях деятельности треста и позволили обеспечить надежное водопользование для десятков населенных пунктов.

Одновременно с работами общей геологической направленности геофизическая служба треста «Киевгеология» активно участвовала и внесла существенный вклад в решение многих важных поисковых задач.

Как упоминалось, одним из приоритетных направлений геологической деятельности треста «Киевгеология» на Украинском щите издавна были поисковые работы на силикатные никелевые руды. Первый массив серпентинитов с нике-

леносной корой выветривания был обнаружен в балке Сухая Деренюха во время геологической съемки масштаба 1:200 000, проводимой в 1949 г. в Среднем Побужье Н. Т. Вадимовым. Уже тогда в пределах окружающей территории под руководством В. И. Андруха была выполнена аэромагнитная съемка масштаба 1:50 000, по результатам которой в районе сел Липовеньки, Терноватое, пгт Капитановка, выявлены магнитные аномалии, часть из которых, как оказалось позже, обусловлена рудными телами. Позже с учетом опыта этих работ была выработана оптимальная методика поиска рудных никеленосных объектов по данным крупномасштабных наземной магнитной и гравиметрической съемок. Результаты работ во многом способствовали созданию в Среднем Побужье сырьевой базы для введенного здесь в действие Побужского ферроникелевого комбината. Попутно в данном районе было открыто Молдовское месторождение ценных карбонат-магнетитовых руд.

Многолетним направлением ПГЭ были поиски и предварительная разведка легкообогатимых, но относительно бедных железных руд Среднего Побужья. Начало этим работам было положено еще в 1920-х годах, когда в Гайворон-Первомайском районе при проведении землемерных работ были выявлены магнитные аномалии высокой интенсивности. В результате магниторазведочной съемки масштаба 1:50 000—1:10 000 в 1950—1960 гг. здесь выявлено около двух десятков перспективных на поиски магнетитового железа аномалий, на которых в 1970-е годы под руководством автора настоящих записок были выполнены детальные гравимагнитные съемки масштаба 1:10 000—1:5 000. Проведенная интерпретация новых данных и сопутствующие им результаты поисково-ревизионного бурения (ПГЭ, ответственные исполнители В. Ф. Богатырев и Г. И. Ионис) позволила установить особенности структурно-тектонического строения рудных залежей Среднего Побужья, дать общую и поблочную оценку прогнозных ресурсов магнетитового желе-

за, определить объекты первоочередного промышленного значения. Фактически было обосновано появление нового железорудного региона Украины. Есть все основания считать, что уже в ближайшее время на базе новых технологий эти месторождения могут стать дополнительным источником металлургического сырья.

Одним из важных поисковых направлений деятельности треста «Киевгеология» издавна являются поиски коренных фосфат-титановых руд в пределах Коростенского и Корсунь-Новомиргородского плутонов Украинского щита. Началом этих работ можно считать открытие в юго-восточной части Коростенского плутона по данным магниторазведки масштаба 1:50 000 (К. А. Болюбах, 1954) неординарной по своим геофизическим параметрам крупной Стремигородской магнитной аномалии высокой интенсивности [Ентин, 2012] и менее значимой Меленской аномалии. По результатам проверочного бурения (Р. П. Патрикиян, 1957) была установлена связь этих аномалий с ильменит-апатитовым оруденением. Однако дальнейшие работы показали неоднозначность картирования титан-фосфатных рудоносных комплексов лишь по данным магниторазведки, которые весьма зависимы от содержания в рудах примесных ферромагнитных минералов — титаномагнетита, пирротина, магнетита. Для эффективного разрешения такой задачи была доказана необходимость комплексирования данных магниторазведки и гравитразведки. В результате на основе данных гравиметрических и магниторазведочных съемок масштаба 1:50 000—1:10 000 в пределах Коростенского плутона были дополнительно открыты Федоровское, Капустянское и другие небольшие коренные титан-ильменитовые месторождения. По тем же критериям в пределах Корсунь-Новомиргородского плутона была выделена Носачевско-Волковская площадь развития меланократовых пород основного состава, часть из которых рекомендовалась на поиски коренных титановых руд. В результате были выявлены Носа-

чевское рудопроявление промышленного значения и более мелкие (Волковское, Вороновское, Цветковское). Эти объекты вполне могут претендовать на высокую инвестиционную привлекательность. В то же время полная геофизическая изученность упомянутыми съемками Корсунь-Новомиргородского и Коростенского плутонов не позволяет надеяться на открытие здесь новых перспективных для разведки подобных рудных объектов.

Поиски коренных фосфато-апатитовых руд в Украине как страны с развитым сельским хозяйством всегда были приоритетной задачей. Известно, что наиболее крупные месторождения этого сырья генетически и пространственно связаны со щелочными комплексами кристаллических пород основного состава. Самый известный из таких объектов в юго-западной части Украинского щита — Проскуровский массив щелочных (субщелочных) пород, был установлен по результатам гравиметрической съемки масштаба 1:50 000 (Б. С. Германов). В дальнейшем по его названию в стратиграфической схеме для УЩ выделен самостоятельный проскуровский субщелочной комплекс основных пород. В настоящее время по результатам гравимагниторазведки в этом регионе установлено несколько более мелких массивов и отдельных тел (Антоновский, Руднянский, Голосковский, Троповский и др.), в пределах которых были поставлены поисковые геологические работы, которые, к сожалению, не дали ожидаемого результата при отсутствии эффективных технологий по обогащению руд с низким содержанием апатита.

Еще одной важной поисковой задачей для геологов треста всегда была перспективная обеспеченность сырьем Завальевского графитового комбината. Введенный в действие еще в 1930-е годы, он начал испытывать затруднения с сырьем уже к концу века. Известно, что рудовмещающим комплексом графитовых руд является электропроводящая толща графит-содержащих гнейсов, что обуславливает эффективность их поисков с помощью

различных методов электроразведки. Положительные результаты геофизических работ подобного направления, выполненных в 1970-е годы Комплексной геофизической партией (Ю. Н. Михайлов), стали необходимой предпосылкой для последующего открытия в ближайшем окружении действующего ЗГК (ПГЭ, Н. Н. Янгичер, В. П. Николаевский) десятка небольших месторождений и рудопроявлений.

В свое время в пределах территории деятельности треста «Киевгеология» активно велись поиски и изучение экзотических локальных структур так называемой импактно(ударно)-метеоритной природы. Импульсом к началу их проведения стали данные гравиметрической съемки масштаба 1:50 000 (Б. С. Германов, 1970), по результатам которой между городами Белая Церковь и Казатин был отмечен интенсивный локальный минимум силы тяжести изометричной формы. Его природа, как установлено бурением, обусловлена наличием здесь глубокой впадины в кристаллическом фундаменте, генезис которой, по мнению некоторых геологов, связан с ударным воздействием космического тела. Но главным в данном случае оказалось то, что в керновом материале пробуренных здесь скважин обнаружено некоторое содержание мелких алмазов и золота. После этого, на основе анализа данных гравиметрических съемок, были проведены специализированные геологические работы, в результате которых в пределах Украинского щита выявлено еще несколько подобных структур, но, к сожалению, без сопутствующих рудных нагрузок. Однако, как и в случае с фосфат-апатитовыми рудами, окончательный вывод о бесперспективности поисков новых подобных структур с полезной рудной нагрузкой может быть сформирован лишь после завершения на всей территории Украины гравиметрической съемки масштаба 1:50 000 и крупнее.

**Р. С.** Работая над воспоминаниями, я неоднократно собирался поставить окончательную точку. Но каждый раз в разбухшем сознании всплывали новые эпи-

зоды, новые старые участники прошлых событий, о которых хотелось упомянуть, и я дополнял ими свое повествование. Определенную роль в этой пролонгации играли некоторые замечания и советы моих коллег, которым я давал возможность ознакомиться с содержанием еще не оконченной «повести временных лет». В конце концов я понял, что всего увиденного и пережитого за 60 лет своей деятельности в геологии не опишешь, и окончательно решил закругляться, послав по электронной почте некоторым моим многолетним сотоварищам по работе свои воспоминания. Не буду вдаваться в подробности полученных мною обратных комментариев и замечаний. Каждый пишет то, что именно он видит и помнит. Однако не могу не остановиться на звонке Вячеслава Николаевича Павлюка — главного геолога ПГЭ, геологической организации, с которой связана большая часть моей личной, как геофизика, производственной деятельности. Оценив в целом довольно доброжелательно мои воспоминания, он, тем не менее, посоветовал дополнить их окончание перечнем тех проблем и возможных упущений, которые, по моему мнению, не удалось по разным причинам решить, и на что следовало бы обратить внимание будущему поколению геологов. Сначала моей ответной реакцией было несогласие с таким предложением, поскольку считал, что мои воспоминания — чисто мемуарные, личностные, а предложенная дополнительная тематика, видимо, должна носить более аргументированный характер. Кроме того, на эту тему я кое-что уже писал [Ентин, 2000, 2006, 2007; Ентин, Дицул, 2006; Двудит и др., 2010].

Однако после разговора с В. Н. Павлюком мне вспомнилась история с великим немецким математиком Давидом Гильбертом, когда ему на рубеже XIX и XX вв., в 1900 г. предложили выступить на 2-м Международном конгрессе математиков в Париже не с отчетом о прошлых достижениях этой науки, а о стоящих перед ней математических проблемах. Именно развитие идей, связанных с содержанием указанных в этом докладе проблем, со-

ставило значительную часть математики XX в. Я, конечно, и близко не ставлю себя рядом с Великими, как и не берусь оценивать масштабные проблемы и будущие задачи, стоящие перед всей геологической отраслью на современном этапе ее функционирования. Но, как говорится, «...из небольшого ручейка начинается река...», поэтому я все-таки принимаю предложение Вячеслава Николаевича и, исходя из своих знаний, опыта и занимаемого места в служебном положении, позволю себе высказать несколько соображений на эту тему, часть из которых в различной мере была затронута в перечисленных выше публикациях.

Как геофизик широкого круга интересов, принимавший участие во многих научно-производственных семинарах и совещаниях, я, надеюсь, справедливо полагаю, что информация об окружающих нас геофизических полях имеет весьма существенное значение для многих сторон жизнедеятельности человеческого общества. Это не только вопросы, связанные с поисками и разведкой полезных ископаемых, но также их космологическое значение и медико-экологическая сторона воздействия на человека и природу в целом, в конце концов, и формирование более высокого культурно-просветительского уровня нашего молодого поколения. По моему мнению, наша задача как профессионалов-геофизиков заключается в получении достоверной геофизической информации для территории страны и создании условий свободного к ним доступа для всех заинтересованных лиц и организаций. Несмотря на постоянные предложения со стороны геофизиков в этом отношении, самостоятельное значение геофизической информации со стороны руководящих геологических структур до настоящего времени не признается. Так, даже при составлении Госгеолкарт-200 последнего поколения, предназначенных в помощь решения широкого круга задач общегосударственного и хозяйственного значения, в ее комплект обязательных графических приложений так и не были

включены детальные карты магнитного и гравитационного полей. Поскольку процесс подготовки Госгеолкарты масштаба 1:200 000 почти завершен, в будущем следует издать в виде самостоятельного атласа магнитные и гравитационные карты того же масштаба на всю территорию Украины.

В ближайшем будущем следует завершить гравиметрическую съемку масштаба 1:50 000 на всей территории Украины, что позволит получить дополнительную возможность для оценки перспектив ее площади на полезные ископаемые и морфоструктур экзотической природы, облегчить переход бытующей у нас геодезической системы на общеевропейскую. Стыдно для геологов Украины, в отличие от геологов европейских стран, до сих пор не иметь на всю территорию детального представления о таком важном параметре нашего природного окружения, как гравитационное поле. Первый же прорыв в информационную блокаду о характере абсолютных значений поля силы тяжести на земной поверхности территории Украины был сделан группой соавторов при публикации подобной карты масштаба 1:1 000 000 [Ентин и др., 2015б].

Основные региональные геологосъемочные работы постсоветского времени по составлению Госгеолкарты 1:200 000 сопровождались переинтерпретацией имевшихся геофизических материалов, а иногда, на некоторых наиболее интересных в геологическом отношении участках, и проведением в небольших объемах детальных гравимагнитных и электроразведочных съемок. В процессе этих работ было выявлено немало геофизических аномалий неясной геологической природы, часть из которых потенциально может заслуживать поисковый интерес. Однако минимальные объемы картировочного и интерпретационного бурения, а то и полное его отсутствие в процессе проведения ГДП-200 указанного периода в основном не позволили оценить практическое значение заявленных поисковых перспектив и геологической природы данных аномалий. При появлении финансовых возмож-

ностей, по-видимому, будет целесообразно организовать тематическую группу по пересмотру и обобщению сделанных рекомендаций по всем проведенным работам в этот период и создать банк перспективных геофизических аномалий, требующих заверки бурением. Такой банк возможно также дополнить за счет пересмотра старых геофизических съемок (до 1970 г.) с учетом нетрадиционного вида небольших по размерам аномалий, не представлявших собой по критериям того времени поискового интереса. В организационном подходе, по нашему мнению, здесь мог бы пригодиться удачный опыт работ партии интерпретационного бурения в 1960-х годах.

Относительно частных, до конца не изученных геологических проблем, в которых я в той или иной мере принимал непосредственное участие, отмечу следующее.

Молдовское железорудное месторождение карбонат-магнетитовых руд изучалось много лет. Помимо его экономическо-промышленной оценки, которая, я надеюсь, все-таки найдет в будущем заинтересованного инвестора, в свое время в северной его части была выделена локальная морфоструктура, которая трактовалась как трубка взрыва. Однако не обнаружив характерных для подобных структур минералов, большинство исследователей отказались от подобной гипотезы, решив, что заполненная брекчией кристаллических пород глубокая впадина является лишь результатом тектонического воздействия. Однако пересмотренные нами результаты прошлых работ позволили весьма определенно установить встречные направления падения противоположных внутренних граней этой трубообразной структуры [Ентин и др., 2015а]. В связи с вновь установленными обстоятельствами, в случае проведения в будущем здесь разведочного бурения, целесообразно было бы вернуться к данному вопросу.

Среди геологов-производственников и ученых, занимающихся вопросами геологии Среднего Побужья, давно ведется полемика по поводу генезиса железных руд

региона. Открытая нами в свое время Песчанская железорудная структура по морфоструктурным параметрам стоит особняком в этом ряду. Тем не менее результаты бурения глубокой (до 1200 м) скважины в сопровождении комплекса скважинных исследований позволили бы, на наш взгляд, получить однозначные сведения о минимальном положении нижней кромки рудного столба и тем самым признать, хотя бы для части структур подобного состава, их эндогенную рудную природу.

За годы своей производственной деятельности мне не единожды приходилось заниматься вопросами изучения геологических особенностей строения района г. Хмельник Винницкой обл., и каждый раз они сопровождались приобретением для меня новых фактических данных, интересных для понимания специфики геологического строения и поисковых перспектив района. Впервые это случилось, когда еще в составе Партии интерпретационного бурения (я был начинающий геофизик), в 1960-х годах, мы базировались в палаточном лагере у с. Соколовка и разбуривали мощную тектоническую зону одноименного названия, представленную глубоким (свыше 200 м) каньоном (линейный карман выветривания) в кристаллическом фундаменте, с приуроченными к ней многочисленными проявлениями урановой минерализации. Тогда же мы побывали на экскурсии в строящемся рядом в г. Хмельник санатории с его уникальными радоновыми водами. Несколько южнее от этого города, с той же базы, мы изучали природу группы Кожуховских магнитных аномалий, обусловленных дайками габбро-диабазового состава.

В 1980-х годах Правобережная геофизическая партия провела геолого-геофизические работы по подготовке геофизических основ под глубинное геологическое картирование бурения в Деражнянском р-не Хмельницкой обл., который непосредственно с юга примыкает к упомянутому выше Хмельникскому структурно-тектоническому узлу. И здесь не обошлось без новых открытий поискового значения.



Интерпретационным бурением было выявлено несколько ранее не известных на этой площади небольших массивов пород ультраосновного состава: Кармалюковский, Багриновецкий, Зяньковецкий, с приуроченными к ним высококонтрастными геохимическими аномалиями минералов редкометалльной группы. Было установлено, что вся группа этих массивов, как и упомянутые выше Соколовское проявление урановой минерализации и Хмельникская штокообразная интрузия(?) лейкогранитов, находятся в одной и той же субмеридиональной тектонической зоне Белокоровицко-Яблоновского разлома. Однако планируемые последующие геологические работы в этом геологическом регионе так и не были проведены и массивы пород остались не оконтуренными, как и не была произведена оценка масштабов развития рудных процессов.

Последний раз мне довелось побывать в этом районе, когда мы, совместно с ПГЭ (ответственный исполнитель Р. Н. Довгань), вели на площади Бердичевского поднятия поисковые работы на коренные источники алмазов. С этой целью на местности восстанавливались и разбуривались локальные магнитные аномалии, в том числе упомянутые магнитные аномалии дайковой природы Кожуховской группы, которые могли быть потенциально интересными на поиски малых интрузий ультраосновного щелочного состава. Порода подобного состава мы не обнаружили, но в 10 км к северу от г. Хмельник, в той же меридиональной тектонической зоне Белокоровицко-Яблоновского разлома, у с. Ждановка, в кристаллическом фундаменте была установлена локальная структура, представленная пироксенит-перидотитами с приуроченным к ним

комплексным рудопроявлением редких и цветных металлов, а также урана. В свое время подробные обстоятельства открытия Ждановского рудопроявления были описаны в работе [Ентин, 2003].

Приведенный выше перечень разнообразных положительных поисковых структурно-вещественных, минералогических и геохимических факторов регионального и локального значения, по нашему мнению, позволяет однозначно рекомендовать этот геологический регион, и прежде всего зону Белокоровицко-Яблоновского разлома, в качестве объекта первой очереди для постановки крупномасштабных поисково-картировочных работ с сопутствующим для этих целей комплексом детальных геофизических работ.

**Благодарности.** Автор глубоко признателен директору Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины В. И. Старостенко за проявленный искренний интерес к настоящей статье и весьма благодарен ему и главному научному сотруднику того же института О. Б. Гинтову за полезные советы по ее структуре и редакторские правки.

Автор также благодарит всех своих коллег — сотрудников по совместной многолетней работе в полевых геофизических партиях за моральную поддержку при написании статьи и уточнение некоторых из изложенных в ней событий.

Отдельная благодарность главному геологу Правобережной геологической экспедиции Вячеславу Николаевичу Павлюку, который давно настойчиво обращался ко мне, как к ветерану геологической службы, с предложением оставить для нового поколения геологов обстоятельства нашей работы в безвозвратно ушедшее время, за полезные советы о желательном содержании настоящих воспоминаний.

### Список литературы

Гинтов О. Б., Ентин В. А., Исай В. М. «О кинематике Ядлов-Трактемировского разлома». *Геофиз. журн.* 1984. Т. 6. № 6. С. 43—48.

Двуліт П. Д., Єнтин В. А., Кучер О. В. Розвиток державної гравіметричної мережі України як пріоритетна складова програм із проб-

- лем мінерально-сировинного забезпечення Країни. *Мінеральні ресурси України*. 2010. № 2. С. 5—6.
- Ентин В. А. Кто сказал первым «мяу», или О роли личности и случая в геологическом поиске. *Геолог Украины*. 2003. № 3—4. С. 122—128.
- Ентин В. А. К истории геолого-геофизического картирования кристаллических комплексов УЩ. Полузабытые страницы. *Геолог Украины*. 2007. № 4. С. 80—85.
- Ентин В. А. О целесообразности дополнения комплекта Госгеолкарты-200 картами геофизических полей. *Мінеральні ресурси України*. 2000. № 4. С. 34—36.
- Ентин В. А. Природные геофизические феномены Украины. Атлас-справочник. Киев: Изд. УкрДГРИ, 2012. 75 с.
- Ентин В. А. Особенности национального погранично-геологического общения (из карпатского дневника). *Геолог Украины*. 2006. № 1. С. 91—96.
- Ентин В. А., Дицун М. С. «Виагра» поисковой эффективности геологических работ на УЩ в прошлом и сегодня. *Геолог Украины*. 2006. № 2. С. 16—22.
- Ентин В. А., Гуськов С. И., Орлюк М. И., Гинтов О. Б., Осьмак Р. В. Карта абсолютных значений поля силы тяжести территории Украины и некоторые аспекты ее возможной интерпретации. *Геофиз. журн.* 2015а. Т. 37. № 1. С. 53—62. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111323>.
- Ентин В. А., Гинтов О. Б., Мычак С. В. Структура Молдовского железорудного месторождения (Украинский щит) по геологогеофизическим данным и его возможная эндогенная природа. *Геофиз. журн.* 2015б. Т. 37. № 4. С. 3—18. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111118>.
- Тектошчна карта України масштаба 1:1 000 000. Под ред. Д. С. Гурского, С. С. Круглова. Киев: УкрДГР1, 2007.
- Старостенко В. И. К 100-летию со дня рождения Георгия Сергеевича Бутакова — геофизика, патриота, дворянина. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 3. С. 139—143.

### Георгію Трохимовичу Продайводі — 80 років



25 липня 2017 р. Георгію Трохимовичу Продайводі, професору кафедри геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, виповнилося 80 років. З його ім'ям пов'язані формування і розвиток методологічних й теоретичних основ петрофізики, сейсмоакустики, інтерпретаційної технології комплексних геофізичних досліджень.

Г. Т. Продайвода (доктор фізико-математичних наук, професор, академік Академії наук Вищої школи України) 10 років (1992—2002) очолював кафедру геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Георгій Трохимович — відомий науковець у таких наукових напрямках, як тензорна петрофізика, математичне моделювання геофізичних параметрів, сейсмоакустика, нелінійна геофізика, фізика Землі, геофізика природних і техногенних катастроф. Він є розробником концепції геофізичної осві-

ти в Україні й фундатором наукової школи геофізики у згаданому закладі.

Після закінчення з відзнакою Київського державного університету ім. Т. Г. Шевченка (1966) Г. Т. Продайвода розпочав свою наукову діяльність у проблемній лабораторії фізико-хімічних досліджень гірських порід геологічного факультету університету, де очолював групу регіональних петрофізичних досліджень лабораторії і польові експедиційні роботи у межах Українського щита, на Кавказі, в Криму та Карпатах. У результаті регіональних петрофізичних досліджень були вперше досліджені густинні, ємнісні, пружні, акустичні й електричні властивості новітніх вулканогенних порід Альпійської зони як у нормальних умовах, так і в умовах високих тисків і температур.

У 1970-ті роки наукові інтереси Г. Т. Продайводи зосередилися на дослідженні впливу кристалохімічних факторів на пружні, акустичні та теплові властивості породоутворювальних мінералів. Ці теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу обґрунтувати природу кореляційних зв'язків між пружними властивостями і мінеральним складом гірських порід. Г. Т. Продайвода спільно з академіком А. С. Поваренних розробили принципи кристалохімічної систематики пружних і акустичних властивостей мінералів та новий метод кількісного оцінювання пружних властивостей мінералів класу силікатів. Г. Т. Продайвода розробив нові ультразвукові методи дослідження швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль у зразках гірських порід.

У першій половині 1980-х років на підставі аналізу стану методологічної бази та існуючої парадигми класичної геофізики Г. Т. Продайвода довів, що пряме перенесення спрощених фізико-геологічних

моделей на геологічні об'єкти практично себе вичерпало. З позицій системного аналізу він висунув методологічну концепцію, згідно з якою геологічне середовище — це багаторівнева упорядкована геосистема з ієрархічним підпорядкуванням структурних рівнів різних масштабів. Георгій Трохимович вважав, що ефективні геофізичні параметри математичної моделі, максимально наближеної до реального геологічного середовища, можна чисельно розрахувати за допомогою методів механіки стохастичного середовища. Розвиток такого підходу привів до відкриття в гірських породах нових сейсмоакустичних явищ. Було теоретично обґрунтовано та експериментально встановлено й досліджено явище акустичного двопробеневого заломлення, поляризаційні ефекти квазі-поперечних хвиль і сингулярна поведінка векторів пружних зміщень у гірських породах, а також явище внутрішньої кінчної рефракції. Це дало змогу в подальшому розробити нові інваріантно-поляризаційні сейсмоакустичні методи пошуків і розвідки корисних копалин.

У 1984 р. Г. Т. Продайвода з метою впровадження наукових розробок у виробництво на геологічному факультеті Київського державного університету ім. Т. Г. Шевченка створив Базову науково-дослідну лабораторію тензорної петрофізики і був призначений її науковим керівником. До завдань лабораторії входила розробка методики й апаратури комплексних петрофізичних досліджень складнобудованих порід-колекторів нафти й газу та керна глибоких і надглибоких свердловин — Кольської, Криворізької та Лисівської.

У 1985 р. у результаті теоретичних й експериментальних акустичних досліджень текстур гірських порід Г. Т. Продайвода відкрив явище інваріантності ізонормальних фазових швидкостей у квазіоднорідному анізотропному геологічному середовищі, згідно з яким сума квадратів ізонормальних фазових швидкостей у будь-яких трьох взаємно ортогональних напрямках хвильової нормалі є сталою величиною.

Г. Т. Продайвода вперше у світовій

практиці запропонував і реалізував новий інваріантно-поляризаційний ультразвуковий метод визначення акустичних і пружних сталих текстур гірських порід за довільної орієнтації робочої системи координат та відсутності апріорної інформації про симетрію текстури. В результаті введення стандартної акустичної системи координат було визначено акустичну й пружну симетрію текстур гірських порід. Для реалізації методу було створено унікальну ультразвукову імпульсно-фазову установку із спеціальним теодолітним пристроєм, яка забезпечувала вимірювання фазових швидкостей та їх векторів поляризації.

Завдяки теоретичним і апаратурно-методичним розробкам було проведено систематичні експериментальні дослідження акустичних і пружних сталих різних генетичних типів гірських порід і встановлено точкові групи симетрії їх текстур. Значні наукові результати стали основою для формування нового наукового напрямку — тензорної петрофізики. Г. Т. Продайвода вперше поставив і математично сформулював задачу вивчення тензорних фізичних характеристик геологічного середовища. В її основу було покладено концепцію «довгохвильового кристала», відповідно до якої гірські породи розглядають як квазіоднорідне анізотропне середовище, ефективні фізичні властивості якого визначаються кількісним складом породотворювальних мінералів та структурою і функціями їх орієнтації. На засадах цієї концепції розроблено методику комплексних досліджень тензорних петрофізичних характеристик, яка забезпечує визначення повних наборів їх тензорних матриць, а також функції розподілу орієнтації мінералів і мікротріщин. Для числових розрахунків і графічного відображення параметрів анізотропії тензорних петрофізичних характеристик було створено комп'ютерну автоматизовану систему. В її розробці брали участь Ю. В. Нахшин і В. І. Нейман. Проблеми тензорної петрофізики та шляхи її розв'язання Г. Т. Продайвода узагальнив у докторській дисертації, яку блискуче за-

хистив у 1991 р. в Інституті фізики Землі ім. О. Ю. Шмідта АН СРСР (м. Москва).

У 1992 р. Г. Т. Продайводу обрано за конкурсом на посаду завідувача кафедри геофізичних методів пошуків і розвідки корисних копалин Київського національного університету імені Тараса Шевченка, у 1993 р. йому присвоєно звання професора. Цей період діяльності Г. Т. Продайводи пов'язаний з реформуванням системи геофізичної освіти. За його ініціативою кафедру геофізичних методів пошуків і розвідки корисних копалин було перейменовано у кафедру геофізики. Георгій Трохимович розробив концепцію базової геофізичної освіти, у чинний перелік напрямів підготовки фахівців було введено геофізику, а також розроблено нові навчальні плани підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів з геофізики. Кафедра перейшла на триступеневу підготовку фахівців. За ініціативою Г. Т. Продайводи був створений філіал кафедри геофізики при Інституті геофізики НАН України, яку очолив член-кореспондент НАН України О. М. Харитонов, а нині очолює член-кореспондент НАН України О. В. Кендзера.

Значний внесок зробив Георгій Трохимович у підготовку фахівців вищої кваліфікації. За його ініціативою в 1996 р. при університеті було створено Спеціалізовану раду із захисту докторських дисертацій за спеціальностями 04.00.22 «геофізика», з 2001 р. — 04.00.25 «геоінформатика», яку він очолював протягом багатьох років. За цей період співробітники кафедри захистили 3 докторські (проф. В. М. Курганський, проф. М. Н. Жуков, проф. С. А. Вижва) та 15 кандидатських дисертацій.

Г. Т. Продайвода приділяв значну увагу використанню нових інформаційних технологій у навчальному процесі і наукових дослідженнях. На кафедрі за його ініціативою та при активній підтримці створено комп'ютерний клас і комп'ютерну мережу, введено нову спеціалізацію «комп'ютерна геофізика».

Г. Т. Продайвода спільно з професором В. В. Грицаком (Інститут кібернетики

НАН України) започаткували новий перспективний напрям геоінформатики й обчислювальної математики – геотопію, у якій органічно поєднано викристалізовані раніше відносно незалежні такі її розділи, як перколяція, формологія й гранулометрія.

Визначний внесок зробив Г. Т. Продайвода у розвиток теорії математичного моделювання ефективних геофізичних параметрів геологічного середовища. Вперше він довів широкі можливості застосування теорії стохастичних полів і методів теорії умовних функцій для дослідження ефективних геофізичних параметрів ієрархічно субпідрядних реальних структур геологічного середовища (мінерал — гірська порода — формація — геоконкомплекс — геосфера) з урахуванням їх дискретності (макро- і мікротріщинуватості), флюїдонасиченості та термопружного стану. Розробив узагальнений метод моментних функцій, який забезпечує числові розрахунки ефективних геофізичних параметрів багатокомпонентного анізотропного геологічного середовища з довільною пружною симетрією і довільною функцією розподілу орієнтації його структурних елементів.

Наприкінці ХХ — на початку ХХІ ст. надзвичайно гостро постала проблема геофізики небезпечних природних і техногенних катастроф та екологічного стану довкілля. Стало очевидним, що в рамках класичної наукової парадигми геофізики розв'язати цю актуальну проблему неможливо. Професор Г. Т. Продайвода разом з професором С. А. Вижвою висунули нову наукову парадигму геофізики, що ґрунтується на новому методологічному підході до вивчення Землі як відкритої гігантської самоорганізованої нелінійної термогравітаційної системи, яка постійно обмінюється з навколишнім середовищем енергією й речовиною. Для реалізації цієї парадигми створено нелінійну багатокомпонентну структурно-ієрархізовану модель геологічного середовища, ефективні статичні й динамічні лінійні і нелінійні геофізичні параметри якої аналітично визначають методами теорії моментних функцій із за-

стосуванням розрахункової схеми Морі—Танака. Для визначення локальних геофізичних параметрів застосовано теорію геофізичних томографічних функціоналів.

У 1995 р. проф. Г. Т. Продайводу було призначено науковим керівником створеної за його ініціативою науково-дослідної лабораторії теоретичної і прикладної геофізики, яку він очолював упродовж 10 років. Основні напрями її наукової діяльності — геофізичний моніторинг небезпечних природних і техногенних процесів, розробка нових геофізичних технологій пошуків і розвідки корисних копалин, нелінійна геофізика, екологічна геофізика, геоінформатика й комп'ютерна геофізика. Під керівництвом і за безпосередньої участі Георгія Трохимовича розроблено інваріантно-поляризаційний сейсмоакустичний метод дослідження земної кори, сейсмомінералогічний метод глибинного картування складу й розломної тектоніки земної кори, нові методи визначення пружних сталих пороодоутворювальних мінералів і нелінійних пружних властивостей гірських порід, комп'ютерну систему геофізичної діагностики геодинамічного стану земної кори.

У 2001 р. вийшла з друку фундаментальна монографія Г. Т. Продайводи у співавторстві з К. С. Александровим, академіком РАН, «Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород». Це перша у світі праця, у якій з позиції єдиного методологічного підходу розглянуто теоретичні й експериментальні результати дослідження анізотропії пружних акустичних властивостей пороодоутворювальних мінералів гірських порід. Поставлено й розв'язано пряму й обернену задачі акустики мінералів і гірських порід. На підставі отриманих результатів і числового математичного моделювання встановлено природу сейсмічної анізотропії земної кори. Виділено три найважливіші типи сейсмічної анізотропії — літологічна, тектонічна й фізична.

Розробка методологічних принципів нової наукової парадигми сучасної геофізики дала змогу проф. Г. Т. Продайводі створити нову комп'ютерну технологію кількісної

3D інтерпретації результатів комплексних геофізичних досліджень, в основі якої лежать принципи геофізичної томографії та побудова багатокомпонентної нелінійної моделі геологічного середовища, що забезпечує глибинне геологічне картування та побудову моделей мінерального, хімічного й петрографічного складу асоціацій гірських порід, картування тектонічних розломів та оцінювання перспективності територій на пошуки корисних копалин.

Наукові напрями, створені проф. Г. Т. Продайводою, розвивають його учні на кафедрі геофізики і у навчально-науковому інституті (ННІ) «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Під його керівництвом підготовлені й успішно захищені докторська й 12 кандидатських дисертацій. З ініціативи Георгія Трохимовича започатковано регулярне проведення міжнародних наукових конференцій із сейсмічної анізотропії, сейсмоакустики та геофізичного моніторингу небезпечних природних і техногенних процесів.

Наукова громадськість високо оцінила наукові досягнення проф. Г. Т. Продайводи. У 1992 р. його було обрано академіком Міжнародної академії комп'ютерних наук і систем, у 1993 р. — академіком АН Вищої школи України, а згодом — академіком-секретарем Відділення наук про Землю АН Вищої школи України, в якому він очолював науковий напрям з проблем геофізики, у 1995 р. — дійсним членом Нью-Йоркської Академії наук США.

У 1996 р. проф. Г. Т. Продайводі за розробку інваріантно-поляризаційного сейсмоакустичного методу дослідження гірських порід було присуджено Премію імені Тараса Шевченка, якою відзначають кращі роботи Київського університету. За видатний внесок у методологію і теорію геофізики проф. Г. Т. Продайвода удостоєний академічної нагороди імені Ярослава Мудрого й медалі В. І. Лучицького. У 2002 р. нагороджений Почесною грамотою Кабінету Міністрів України, а у 2009 р. за рішенням Кабінету Міністрів України йому присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки

і техніки України».

Значним є внесок проф. Г. Т. Продайводи в організацію і розвиток геофізичної освіти України. Він — організатор нового навчально-методичного комплексу спеціальності «геофізика». Підготував і видав шість підручників і навчальних посібників, у соавторстві з О. А. Трипільським — перший україномовний підручник «Сейсморозвідка» (2007). Георгій Трохимович упродовж багатьох років читав на кафедрі геофізики розроблені ним курси «Фізика Землі», «Механіка суцільного середовища», «Сейсмоакустика», «Математичне моделювання геофізичних параметрів». Він — автор 25 патентів і понад 300 наукових праць. Упродовж науково-педагогічної діяльності проф. Г. Т. Продайвода виконував обов'язки го-

лови Відділення Європейської асоціації вчених (EAGE) при Київському університеті (1996—2003), експерта Державного центру науково-технічної експертизи, члена експертної ради Вищої атестаційної комісії України (2009—2015), члена Спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій у Київському університеті (1995—2016). Від 2007 до 2016 р. Г. Т. Продайвода працював професором кафедри геофізики на основі сумісництва.

Колектив кафедри геофізики й ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, наукова громадськість щиро вітають Георгія Трохимовича з 80-річним ювілеєм, зичуть йому міцного здоров'я, духовних і фізичних сил, невичерпної наснаги та успіхів у житті й науковій діяльності.

*Колеги, друзі, учні*

## **Правила для авторов**

---

Редакция «Геофизического журнала» принимает статьи и научные сообщения на русском, украинском или английском языках, материалы публикуются бесплатно. Статьи направлять в редакцию «Геофизического журнала» по адресу, указанному ниже, либо через сайт <http://journals.uran.ua/geofizicheskiy>, где необходимо будет зарегистрироваться.

В начале статьи необходимо указать индекс УДК, ФИО авторов, названия организаций и их полные почтовые адреса, контактные номера телефонов, телефакс и адрес электронной почты (E-mail). Просьба указывать все имена и отчества авторов и с кем вести переписку.

Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Word на листах формата А4 через полтора интервала, с использованием шрифта Times New Roman размером 14 пт. Поля со всех сторон – 2.5 см, выравнивание — по ширине. В начале каждого абзаца делается отступ 1.25 см. Перенос слов не допускается. Страницы нумеруются в правом нижнем углу. Сокращения в тексте статьи, кроме стандартных, соответствующих Международной системе единиц СИ, не допускаются. Рисунки, таблицы, список литературы, подрисуночные подписи и резюме на русском, украинском и английском языках, ключевые слова следует давать на отдельных страницах; формулы должны быть набраны обязательно в приложении Equation или MathType. В статьях можно использовать только единицы системы СИ. Текст аннотации должен быть не менее 20 строк и содержать краткий обзор проблемы, анализ и выводы.

Рисунки оформляются в редакторах векторной графики и представляются в форматах CorelDRAW (.cdr) 13-я версия. Растровая графика (фотографии, сканированные материалы) представляется в формате TIFF или JPEG (сохранение в формате JPEG необходимо производить в максимальном или высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Объем одного рисунка не должен превышать 5 Мб. Превышение указанного объема возможно при согласовании с редакцией. Подписи к рисункам оформляются отдельным файлом в формате Microsoft Word.

Рисунки, вставленные в Word, не принимаются. Кроме того, каждый рисунок не может превышать размера журнальной страницы (160×230 мм). Журнал публикует только черно-белые иллюстрации. Цветные иллюстрации могут быть опубликованы в печатной версии журнала только при условии их оплаты автором статьи.

Список литературы составляется в алфавитном порядке (сначала на русском и украинском языках, а затем — на иностранном) без номеров. В списке литературы по каждому литературному источнику обязательно указывать всех авторов. В тексте при ссылке на литературный источник в квадратных скобках необходимо писать фамилию автора и через запятую — год издания (если два автора, то указывать обоих, если три и более — первого и др.). Все работы, на которые есть ссылки в квадратных скобках, должны быть приведены в списке литературы. И наоборот, на всю приведенную литературу должны быть ссылки в квадратных скобках в тексте статьи.

Верстка статьи направляется автору для проверки и исправления ошибок. Автор не должен вносить существенных изменений. Рекомендуется пользоваться электронной почтой и сообщать об исправлениях в первые три дня после получения верстки.

Обновленные правила оформления статей и списка литературы смотрите на сайте: <http://journals.uran.ua/geofizicheskiy/about>.

Подача статьи в журнал означает, что она оригинальна, нигде не публиковалась и не направлена для других изданий. Статья должна быть подписана всеми авторами.

Обращаем внимание авторов, что в случае воспроизведения ими в статье ранее опубликованных графических или иных материалов, защищенных авторским правом, недостаточно только дать библиографическую ссылку на источник воспроизводимых материалов. Авторы обязаны получить письменное разрешение правообладателя ранее опубликованных (в печатном или электронном виде) материалов на их воспроизведение в статье авторов. При отсутствии письменного разрешения на воспроизведение ранее опубликованных материалов статья не принимается к рассмотрению.



## Адрес редакции

Украина 03142, Киев-142, просп. акад. Палладина, 32  
Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, комн. 220  
Телефон +380 (44)424—11—65, факс +380 (44)450—25—20  
E-mail: [journal@igph.kiev.ua](mailto:journal@igph.kiev.ua)  
<http://www.igph.kiev.ua>  
<http://journals.uran.ua/geofizicheskiy>

*Печатается по постановлению редакционной коллегии  
и ученого совета Института геофизики НАН Украины*

*Свидетельство государственной регистрации,  
серия КВ № 12952-1836 ПР от 20.07.2007*

*Включен в перечень научных специализированных изданий  
Украины в отрасли Геологические науки  
(приказ МОН Украины от 10.07.2015 г. №1021)*

*Реферируется/индексируется в наукометрических базах:*

CrossRef  
Web of Science Core Collection  
РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)  
Национальной библиотеки Украины им. В.И. Вернадского  
«Научная периодика Украины»  
WorldCat

Редакторы *И. А. Калитова, О. И. Калашникова*  
Технический консультант *Д. Н. Гринь, Т. А. Амашукели*  
Компьютерная верстка *О. В. Шетик*  
Компьютерная графика *Я. Ю. Дулицкой*