

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

# Геофизический ЖУРНАЛ



**1**

2018

ТОМ 40

Geophysical  
journal



Главный редактор *В. И. СТАРОСТЕНКО*  
Заместитель главного редактора *Я. М. ХАЗАН* (Берлин, Германия)

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*В. Г. Бахмутов, Т. А. Белый, А. Б. Бобров, Т. К. Буратович, Д. Б. Венгрович, С. А. Выжва, О. Б. Гинтов, Н. М. Гладких* (ответств. секр.), *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. Бешуцьо* (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* (Стамбул, Турция), *С. А. Тихоцкий* (Москва, Россия), *Т. Л. Челидзе* (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* (Berlin, Germany)

#### EDITORIAL BOARD

*V. G. Bakmutov, T. A. Belyi, 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, D. B. Vengrovich, 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. Hovhannisyann* (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* (Istanbul, Turkey), *S. A. Tikhotsky* (Moscow, Russia), *M. S. Zhdanov* (Solt Lake City, USA), *S. S. Zilitinkevich* (Helsinki, Finland)

---

Подп. в печ. 02.01.18. Формат 60 × 84/8. Бум. офсетная № 1. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 19. Тираж 210 экз.

---

Типография фирмы "Эссе". Киев, просп. Вернадского 34/1

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ

## Geophysical journal

# ЖУРНАЛ

Основан в июле 1979 г.

Выходит 6 раз в год

Том 40

Международный  
журнал

An International  
Journal

№ 1 • 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Йосифов Димчо, Рагичев Раги.</i> Земная кора крупных месторождений цветных металлов Болгарии .....	3
<i>Тяпкин Ю. К., Тяпкина Е. Ю.</i> Новая технология оценки временных сдвигов при сейсмическом мониторинге эксплуатации нефтегазовых месторождений и подземных газовых хранилищ .....	15
<i>Русаков О. М., Корчагин И. Н., Якимчук Н. А., Левашов С. П., Соловьев В. Д., Божежа Д. Н.</i> Применение спутниковых снимков при изучении потенциальных ресурсов углеводородов в лицензионных блоках 9 и 11 в эксклюзивных экономических зонах Египта и Кипра .....	27
<i>Муровская А., Ипполит Ж.-К., Шеремет Е., Егорова Т.</i> Современные и палеонапряжения в пределах северной окраины Черного моря и Горного Крыма в мезо-кайнозой—квартере (по механизмам очагов землетрясений и полевым тектонофизическим данным) .....	44
<b>Климчук Е. Ф., Тарасов В. Ф.</b> О критической массе парникового газа .....	70
<i>Гончар В. В.</i> Модели несоосного деформирования в структурном анализе складчатости Украинских Карпат .....	78
<i>Кравчук М. В., Корчин В. А., Коболев В. П., Новик Н. И.</i> Комплекс экспериментальных исследований электрических свойств горных пород в инертной среде .....	93
<i>Савкив Л. Г., Лаганивский Б. Т.</i> Современные информационные технологии при организации геофизических исследований .....	107
<i>Сумарук П. В., Сумарук Т. П.</i> Вековые вариации геомагнитного поля на литосферных плитах Земли .....	118

## Памяти ученого

<i>Памяти Андрея Николаевича Герасименко (13.12.1947—06.08.1982) .....</i>	134
<i>Олали Н. В., Малежик М. П.</i> Главному редактору "Геофизического журнала" В.И. Старостенко .....	153

## ЗМІСТ

<i>Йосифов Дімчо, Радічев Раді.</i> Земна кора великих родовищ кольорових металів в Болгарії .....	3
<i>Тяпкін Ю. К., Тяпкіна О. Ю.</i> Нова технологія оцінки тимчасових зсувів при сейсмічному моніторингу експлуатації нафтогазових родовищ та підземних газових сховищ .....	15
<i>Русаков О. М., Корчагін І. М., Якимчук М. А., Левашов С. П., Соловйов В. Д., Божежа Д. М.</i> Використання супутникових знімків при вивченні потенційних ресурсів вуглеводнів у ліцензійних блоках 9 і 11 в ексклюзивних економічних зонах Єгипту та Кіпру .....	27
<i>Муровська А., Іпполіт Ж.-К., Шеремет Є., Єгорова Т.</i> Сучасні та палеонапруження в межах північної окраїни Чорного моря та Гірського Криму в мезо-кайнозої—квартері (за механізмами очагів землетрусів і польовими тектонофізичними даними) .....	44
<b>Климчук Є. Ф.</b> , <i>Тарасов В. Ф.</i> Про критичну масу парникового газу .....	70
<i>Гончар В. В.</i> Моделі неспіввісного деформування у структурному аналізі складчастості Українських Карпат .....	78
<i>Кравчук М. В., Корчин В. О., Кобольв В. П., Новік М. І.</i> Комплекс експериментальних досліджень електричних властивостей гірських порід в інертному середовищі .....	93
<i>Савків Л. Г., Ладанівський Б. Т.</i> Сучасні інформаційні технології в організації геофізичних досліджень .....	107
<i>Сумарук П. В., Сумарук Т. П.</i> Вікові варіації геомагнітного поля на літосферних плитах Землі .....	118

### Пам'яті вченого

<i>Пам'яті Андрія Миколайовича Герасименка (13.12.1947—06.08.1982) .....</i>	134
<i>Олалі Н. В., Малежик М. П.</i> Головному редактору "Геофізического журнала" В. І. Старостенко .....	153

## CONTENTS

<i>Yosifov Dimcho, Radichev Radi.</i> Earth's crust of large deposits of non-ferrous metals in Bulgaria .....	3
<i>Tyapkin Yu. K., Tyapkina O. Yu.</i> A new technology for estimating time shifts in seismic monitoring of the exploitation of oil and gas fields and underground gas storage sites .....	15
<i>Rusakov O. M., Korchagin I. N., Yakymchuk N. A., Levashov S. P., Soloviev V. D., Bozhezha D. N.</i> Implication of satellite images in studying potential hydrocarbon resources in the licence Blocks 9 and 11, the exclusive economic zones of Egypt and Cyprus .....	27
<i>Murovskaya A., Hippolyte J.-C., Sheremet Ye., Yegorova T.</i> Recent and paleo-stresses at the northern margin of the Black Sea and the Crimea Mountain in Meso-Cenozoic—Quarter (according to mechanisms of earthquakes foci and field tectonophysical data) .....	44
<b>Klimchuk E. F.</b> , <i>Tarasov V. F.</i> On the critical mass of greenhouse gas .....	70
<i>Gonchar V. V.</i> Models of out-of-line deformation in structural analysis of folding of the Ukrainian Carpathians .....	78
<i>Kravchuk M. V., Korchyn V. A., Kobolev V. P., Novik N. I.</i> A system of experimental studies of electric properties of rocks in the inert medium .....	93
<i>Savkiv L. G., Ladanivskyy B. T.</i> Modern information technologies in organization of geophysical studies .....	107
<i>Sumaruk P. V., Sumaruk T. P.</i> Secular variations of the geomagnetic field on lithosphere plates of the Earth .....	118

### In memory of a scientific

<i>In memory of Andrej Nikolayevich Gerasimenko (13.12.1947—06.08.1982) .....</i>	134
<i>Olali N. V., Malezhyk M. P.</i> To Editor-in-Chief of "Geophysical Journal" V. I. Starostenko .....	153

## Земная кора крупных месторождений цветных металлов Болгарии

© Димчо Йосифов<sup>1</sup>, Ради Радичев<sup>2</sup>, 2018

<sup>1</sup> Научно-технический союз по горному делу, геологии  
и металлургии, София, Болгария

<sup>2</sup> Горно-геологический университет "Св. Иван Рильский",  
кафедра "Прикладная геофизика", София, Болгария

Поступила 27 ноября 2017 г.

Розглянуто основні результати досліджень будови земної кори у найбільших рудних районах Болгарії — Панагюрському і Центрально-Родопському. Підтверджено уявлення про її континентальний тип. Доведено наявність розривів поділу Мохо, що різняться значною вертикальною амплітудою (від 7—8 до 13—14 км), які підсилюють і каталізують ендегенні процеси, зокрема рудоутворювальні. Встановлено велику щільність глибинних розривів кори, причому крім відомих мантієвих розломів, що обмежують основні поздовжні тектонічні одиниці (Маришський тектонічний шов і Забалканська розломна зона), намічено ще два — Південносередньогірський і Південнородопський. У місцях їх перетину із субмеридіональними рудоконцентрувальними структурами (Панагюрською і Центрально-Родопською) утворилися коромантієві тектонічні вузли, в ареалах яких розміщуються основні рудні поля. Земна кора у досліджуваних рудних районах характеризується градієнтними змінами її глибинної структури — суттєвою тектонічною роздробленістю, високою ендегенною проникністю, інтенсивною магмонасиченістю і значним за масштабами рудоносним потенціалом.

**Ключові слова:** глибинна будова, межа Мохо, глибинні розломи, тектонічні вузли, металогеія.

**Введение.** Проблемы строения земной коры территории Болгарии на основании данных геофизической разведки были объектом исследования ряда геофизиков (Ив. Петков, Хр. Дачев, Т. Добрев, Д. Йосифов, Р. Радичев и др.). В это направление и, прежде всего, в интерпретацию геофизических данных свой вклад внесли и геологи (Р. Димитров, Д. Димитров, Ив. Монахов, Б. Маврудчиев, Ив. Загорчев и др.). Во второй половине XX века были осуществлены масштабные для страны региональные геофизические работы, включающие гравиметрические и магнитометрические съемки, термометрические и сейсмометрические измерения. Целенаправленно осуществлялись и наблю-

дения по нескольким профилям методами глубинной геофизики — глубинно-сейсмическим (ГСЗ) и электромагнитным зондированием (ГЭМЗ). Изготовлены различные по масштабу карты и составлены схемы районирования гравитационного и магнитного полей, скоростных, плотностных, магнитных и тепловых моделей земной коры, а также множества глубинных геофизических и геолого-геофизических разрезов. На основании комплексной интерпретации накопленного фактического материала и, прежде всего, результатов глубинных геофизических методов уже установлены важные закономерности в строении коры.

В последние годы в результате плодот-

творного сотрудничества между болгарскими и греческими геофизиками были получены новые данные о глубинном строении земной коры Центральных Родоп [Йосифов и др., 2016]. Кроме того, после реинтерпретации геофизической информации о Центральном Средногории существенно расширились представления о глубинной тектонике данного региона [Йосифов, Радичев, 2016]. Известно, что в этих двух районах обнаружены и разведаны самые крупные мантийного типа месторождения цветных металлов в Болгарии, а также проведены в их пределах профили ГСЗ и ГЭМЗ. Таким образом, созданы относительно благоприятные условия для осуществления конкретных исследований строения земной коры и на отдельных частях территории нашей страны, а также пространств, занятых крупными месторождениями цветных металлов. Нет сомнения, что результаты таких исследований представляют интерес не только для геофизиков, но и для специалистов аналогичных направлений наук о Земле. С этих позиций обуславливается актуальность и целесообразность предлагаемой обобщающей публикации, в которой рассматриваются и оригинальные авторские достижения.

### **Краткая характеристика крупных месторождений цветных металлов в Болгарии**

На основании значительных по объему геологоразведочных работ за период 1949—1980 г. в Болгарии был обнаружен и разведан ряд месторождений энергетических, металлических и нерудных полезных ископаемых, а также создана минерально-сырьевая база. Наряду с этим были установлены месторождения со значительными запасами медных и золото-содержащих руд в Панагюрском рудном районе и свинцово-цинковых, серебро-содержащих оруденений в Центральных Родопах. В соответствии с общепринятым металлогеническим районировани-

ем страны первый район располагается в Средногорской структурно-металлогенической зоне, а второй — в Родопской металлогенической области (провинция) (рис. 1).

Наиболее высокой металлогенической продуктивностью отличается Центральное Средногорие, где установлены крупнейшие медно-колчеданные и медновкрапленные месторождения. В Панагюрском рудном районе разведано четыре крупных медно-колчеданных золотосодержащих месторождений (Челопеч, Красен, Радка и Елшица) и пять крупных медно-колчеданных, золотосодержащих месторождений (Медет, Асарел, Елаците, Цар Асен и Влайков врых), а также ряд рудопроявлений. Почти 90 % запасов медных руд в Болгарии сосредоточено в этом же рудном районе. Месторождения связаны с вулcano-плутоническими центрами, являющимися продуктами субдукционного магматизма верхнего мела (турон—сенон) [Богданов, 1987], и располагаются в Панагюрской субмеридиональной глубоко проникающей рудоконцентрирующей структуре [Йосифов, 2007]. Термин "рудоконцентрирующая структура" позаимствован из работ известных русских металлогенистов И. Н. Томсона и М. А. Фаворской.

В Центрально-Родопском рудном районе обнаружены и изучены самые крупные свинцово-цинковые, серебро-содержащие месторождения в стране, среди которых по своему экономическому значению отличаются два рудных поля — Маданское и Лыкинское. В этом районе установлено около 70 % запасов свинца и цинка, большая часть которых уже добыта [Димитров и др., 1988]. Месторождения пространственно размещаются в известной Центрально-Родопской рудоконцентрирующей структуре, намеченной геофизическими данными [Йосифов, 2007]. Свинцово-цинковые оруденения связываются с проявлениями палеогенового (эоцен-олигоцен) коллизионного магматизма. В этот период магматично-флюидная рудоносная система в металлоген-

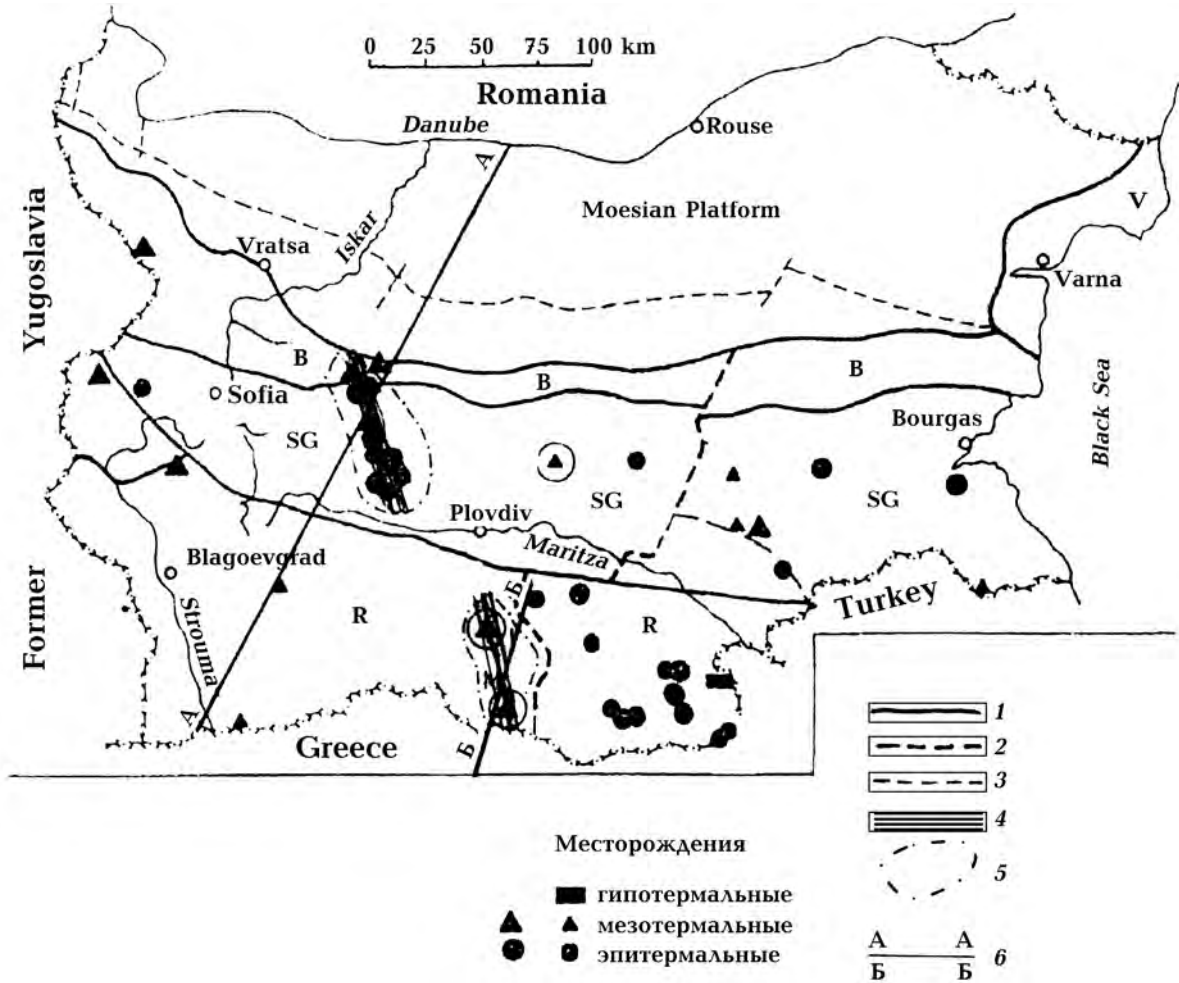


Рис. 1. Металлогеническая карта Болгарии, по [Dokov et al., 1989] с дополнениями и изменениями: 1 — границы металлогенических единиц; 2 — граница между Восточной и Западной частями металлогенических единиц; 3 — южная граница Мизийской платформы; 4 — рудоконцентрирующие структуры (Панагорская в Средногории и Центрально-Родопская в Родопах); 5 — область динамических воздействий рудоконцентрирующих структур; 6 — AA — геофизический профиль Петрич—Никополь, ББ — геофизический профиль Паничково—о. Тасос. Металлогенические единицы: В — Балканская зона; SG — Средногорская зона; R — Родопская провинция; V — Варненский регион.

ном отношении достигла наибольшей продуктивности.

И в этих двух рудных районах проведены сотни тысяч линейных метров (л.м) скважин и десятки тысяч л.м горных выработок, на основании которых осуществлены значительные по объему и широкие по охвату научные исследования. В деталях изучены: геологический состав (стратиграфия, палеонтология, минералогия) отдельных месторождений, их структура, минеральный и формационный состав руд. В высокой степени выяснены

условия отложения оруденения и их концентрации в виде рудных тел и месторождений. Наряду со специфическими чертами в геологическом строении рассматриваемых двух рудных районов выделяются и некоторые важные общие особенности. Прежде всего, следует отметить благоприятное сочетание структурных, магматических и термодинамических условий формирования крупных месторождений, среди которых выделяются два важных фактора: масштабность, с одной стороны, и продолжительность

соответствующих магменных проявлений, с которыми связываются оруденения, — с другой. В соответствии с накопленной геолого-геофизической информацией и ее научным анализом было доказано, что формирование рассматриваемых крупных эндогенных месторождений цветных металлов происходит за счет процессов, которые протекают в мантийных частях литосферы [Богданов, 1987; Димитров и др., 1986]. Комплексный анализ геолого-геофизических данных свидетельствующий о существенной роли в размещении и локализации мантийных месторождений в рассматриваемых рудных районах, играют магматические и структурные факторы. При этом магматические факторы имеют подчеркнутое значение при образовании медно-колчеданных и медно-вкрапленных золотоносных месторождений Центрального Средногория, а структурный фактор ярче выражен для свинцово-цинковых сереброносных месторождений Родопского массива. Важно также отметить, что рудные поля локализуются на участках, отличающихся специфическими геохимическими аномалиями. По всей длине обеих рудоконцентрирующих структур установлены региональные линейные и контрастные аномалии, а рудные поля располагаются в ареале интенсивных геохимических узлов. В Центральном Средногории аномалии представлены Cu, Au, Mo, Co, Ni, а в Центральных Родопах — Pb, Zn, Se, Mo, Ba.

### Структура земной коры рудных районов

Для выяснения строения земной коры решающее значение принадлежит данным, полученным в результате проведенных профильных измерений по методам глубинного сейсмического зондирования и, в частности, по методу магнитно-теллурического и магнитно-вариационного зондирования [Вольвовский и др., 1985; Дачев, 1988; Йосифов и др., 2016]. При

этом глубинное сейсмическое зондирование включает и изучение отраженных волн землетрясений. Весьма благоприятным для предлагаемой разработки оказывается то обстоятельство, что сейсмические профили по глубинному зондированию целенаправленно запланированы и реализованы и в самые продуктивные рудоносные части территории страны — Центральное Средногорие и Центральные Родопы. Это исключает необходимость в интерполировании данных дискретных измерений, что характерно для мировой практики. В данном случае проанализирована и интерпретирована информация о других геофизических методах — гравиметрии, магнитометрии, термометрии, чем созданы условия для дополнения знаний о строении и составе земной коры и процессах, протекающих в ее глубинных частях.

Принадлежность рассматриваемых рудных районов к различным тектоническим и металлогеническим единицам, как и различное качество и содержание применяемых первичных геофизических материалов, являются причиной осуществить самостоятельно рассмотрение основных элементов строения земной коры.

**А. Панагюрский рудный район.** Самая представительная и относительно точная информация о строении земной коры получена по VII международному профилю, который отработан посредством регистрации сейсмических волн, являющихся результатом промышленных взрывов и обменных волн землетрясений [Вольвовский и др., 1985; Дачев, 1988]. Этот профиль располагается поперек основных тектонических единиц Альпийского орогена и пересекает под очень острым углом Панагюрскую рудоконцентрирующую структуру. Анализ и интерпретация данных профильного глубинного зондирования показывают, что земная кора в регионе отличается гетерогенной слоистой блоковой структурой. Намечено несколько глубоко проникающих разрывов, в том числе и до верхней мантии, как и серия квазигоризонтальных сейсмических внут-



риковских границ, расположенных на различной глубине, большая часть которых по простиранию прерваны (рис. 2).

К установленным мантийным разломам относится Маришский тектонический шов, ограничивающийся с юга Средногорской структурно-металлогенической зоной и Забалканским глубинным разломом в качестве границы зоны с севера. А недавно трассированный по сейсмическим и гравиметрическим данным Южно-Средногорский мантийный разлом разделяет Центральное Средногорье на две части — северную и южную [Йосифов, Радичев, 2016]. Эти три разлома имеют субширотную ориентацию и определяют продольную тектоническую зональность региона. Как разрывающая кору и входящая в верхнюю мантию проявляется

также и Панагюрская рудоконцентрирующая структура, которая, как было уже отмечено, пересекает поперек основные тектонические единицы Альпийского орогена. Следует добавить, что по длине сейсмического профиля установлено и несколько тектонических разрывов, затихающих в земной коре на глубине не более 25—30 км.

По длине VII международного профиля прослежена серия сейсмических границ, включая и поверхность раздела Мохо. Севернее Южно-Средногорского мантийного разлома четыре, а южнее — три. Самая верхняя граница, установленная только в депрессиях, связывается с фундаментом и представленными, главным образом, докембрийскими метаморфитами и герцинскими гранитоидами. Она отлича-

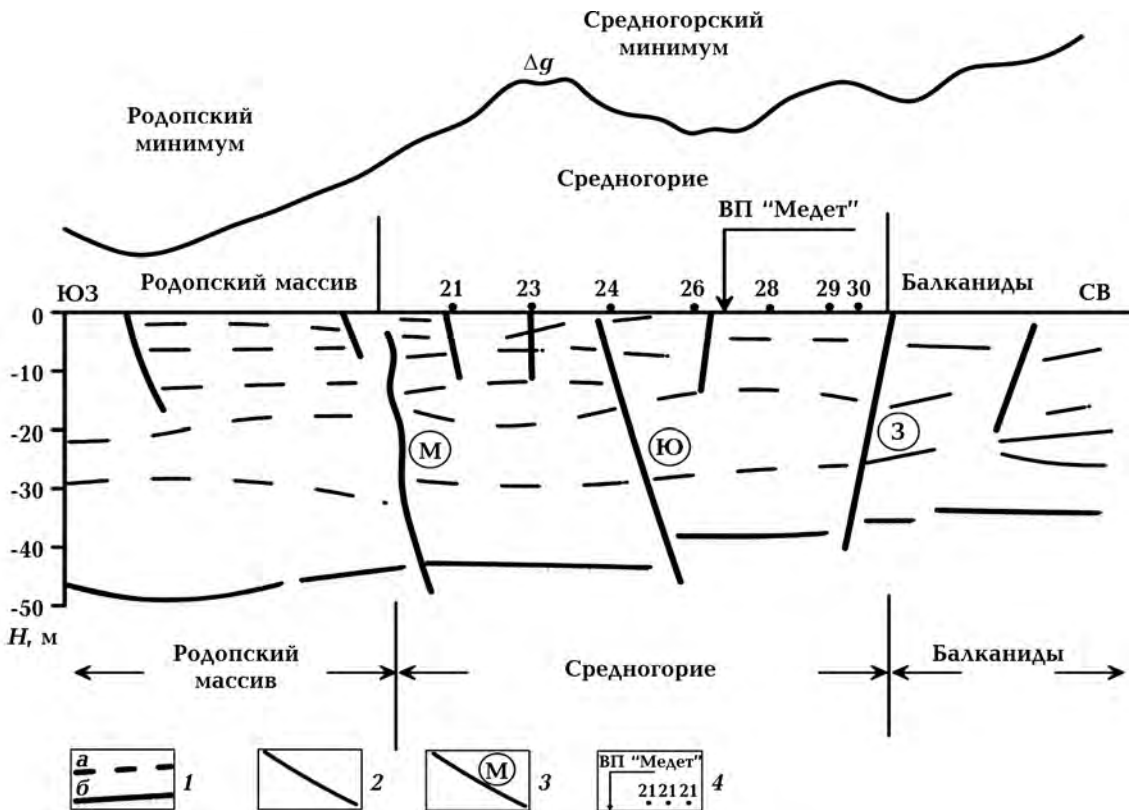


Рис. 2. Фрагмент сейсмического разреза по профилю Петрич—Никополь в участке Средногорского гравитационного минимума (по [Вольвовский и др., 1985]): 1 — сейсмические границы (а), поверхность Мохо (б); 2 — разломы; 3 — мантийные разломы (Маришский тектонический шов (М), Забалканский (З), Южно-Средногорский (Ю)); 4 — значение на профиле взрывного пункта и номер точек регистрации.

ется скоростью сейсмических волн от 4,0 до 4,8 км/с. Кристаллическая часть земной коры в зависимости от скорости распространения сейсмических волн делится на два слоя: гранитно-метаморфический со средней скоростью 5,9—6,1 км/с и базальтовый со средней скоростью 6,6 км/с. Разделяющая их граница прослеживается сравнительно уверенно и располагается на глубине 15—18 км. Остальные внутрикоровые границы ограничены по своему площадному развитию в различной степени для каждой из них. При реинтерпретации первичного сейсмического материала оказалось, что в северной части профиля можно отделить "волновод" мощностью порядка 6—8 км.

Планетарная граница — раздел Мохо прослеживается по всему профилю непрерывно с характерной для нее скоростью упругих волн от 7,8 до 8,1 км/с. Наблюдается слабовыраженная тенденция поднятия этой границы с юга на север и незначительное понижение в центральной части профиля, что отмечает западная периферия известной Центрально-Средногорской депрессии на подошве земной коры. Эта депрессия находит отражение и в гравитационном поле в виде интенсивного регионального минимума, который является основанием ограничения ее площадного развития. Но самым существенным элементом в строении поверхности Мохо являются значительные вертикальные амплитуды ее разрыва в ареале мантийных разломов. Таким образом, значение амплитуды Маришского тектонического шва составляет 5—6 км, Южно-Средногорского — 10, а Западно-Балканского — 8. Налицо все основания допустить аналогичный разрыв Мохо в ареале Панагорской рудоконцентрирующей структуры — утверждение, в котором существуют геофизические, металлогенные и геологические данные. Наличие таких разрывов со значительной вертикальной амплитудой имеет важное металлогеническое значение, так как интенсифицирует и катализирует протекание рудообразовательного процесса.

Рассматривая пространственное расположение упомянутых различно ориентированных мантийных разломов, следует отметить, что, взаимодействуя друг с другом, они пересекаются. При этом особенно важным является пересечение Панагорской рудоконцентрирующей структуры с Южно-Средногорским, Медетским и Забалканским глубинными разломами. В местах пересечения формировалось несколько глубинных тектонических узлов, главная характеристика которых заключается в значительной разрывности и эндогенной проницаемости их пространств. Именно в них созданы благоприятные условия для непосредственного проявления интенсивных тектономагматических процессов в верхнем меле, с которыми ассоциируют крупные медно-пиритные и медно-колчеданные рудные поля в Центральном Средногории (Елшицско-Радкинском, Асарел-Медетском и Елацско-Челопечском).

**Б. Центрально-Родопский рудный район.** Современное представление и знания о глубинном строении земной коры Родопского массива построены на основании результатов комплексной интерпретации двух профилей ДСС и региональных аномалий потенциальных полей, естественного теплового поля и сейсмичности. При этом один из сейсмических профилей непосредственно проходит через Центрально-Родопский рудный район [Йосифов и др., 2016], а второй (VII международный) — через западную часть Родопского массива [Вольвовский и др., 1985; Дачев, 1988]. Именно по этим двум профилям получены важные количественные данные о положении внутрикоровых границ, разломных нарушений и глубине, на которую они проникают (рис. 3). Для трассирования некоторых глубинных разломов использована информация о потенциальных методах и сейсмологии.

Анализ геофизического разреза (см. рис. 3) от Паничково до греческого о-ва Таос, представляющего фрагмент регионального профиля, интерпретация которого не завершена из-за отсутствия первичных материалов, свидетельствует о слож-

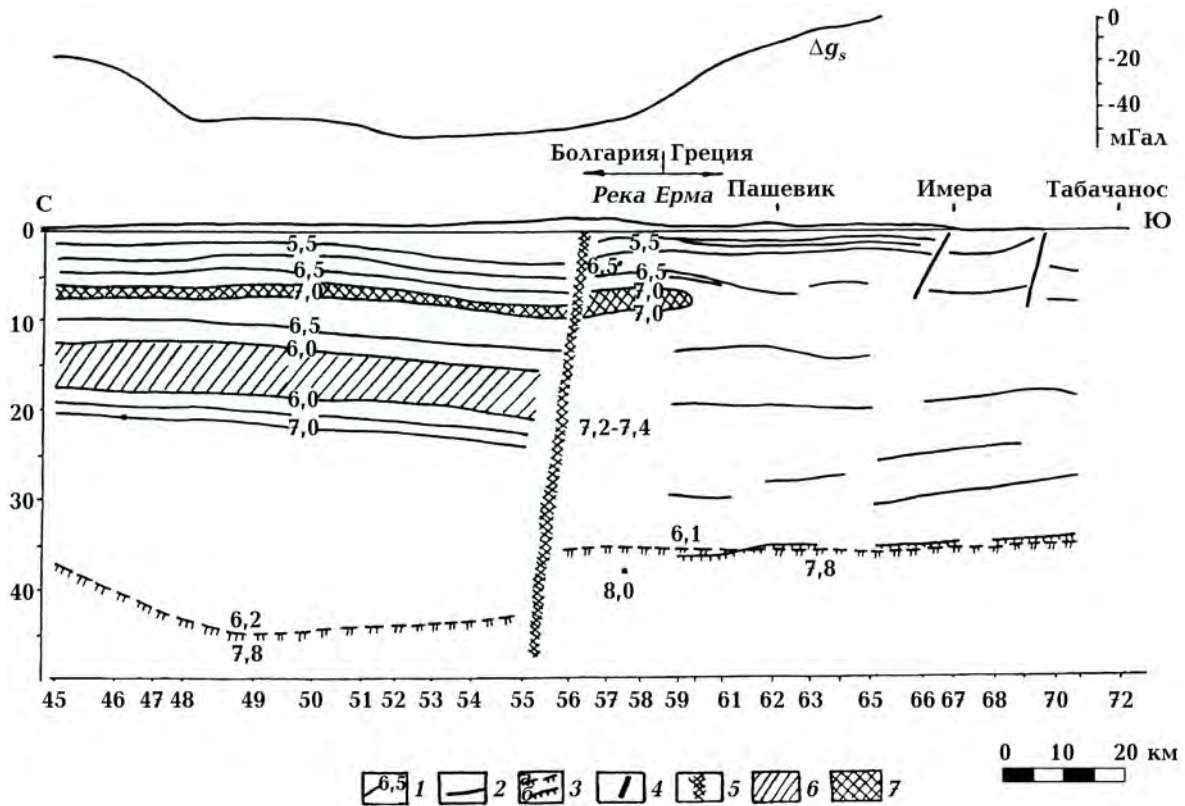


Рис. 3. Сейсмический разрез Паничково—о-в Тасос: 1 — скорость сейсмических волн; 2 — сейсмические границы; 3 — поверхность Мохо; 4 — коровые разломы; 5 — Южно-Родопский литосферный разлом; 6 — низкоскоростной слой (волновод); 7 — высокоскоростной слой.

ном глубинном строении Центрально-Родопского рудного района. В южной части профиля прослежено три глубоко проникающих разлома, один из которых мантийного типа и назван Южно-Родопский [Йосифов и др., 2016]. Этот разлом проявляется как сложнопостроенная гравитационная ступень, имеющая субширотную ориентацию. К тектоническим нарушениям с вероятной глубиной проникновения в верхнюю мантию относится Центрально-Родопская разломная зона, имеющая субмеридиональное направление. Самым характерным является то, что в ее пространственном ареале вмещаются основные свинцово-цинковые рудные поля Родопского массива и поэтому она определена как рудоконцентрирующая [Йосифов, 2007]. Наличие глубинных разломов разного направления обусловило формирование серии тектонических узлов,

среди которых выделяется Маданский, относящийся к коромантийному типу. В строении этого участвуют и коровые разрывы, а его пространство отличается высокой проницаемостью и интенсивной эндогенной активностью, в которых эоцен-олигоценый рудогенез достиг своего апогея.

Впечатляет относительно низкая скорость сейсмических волн 7,8 км/с раздела Мохо и 6,2 — нижней части земной коры Центрально-Родопского рудного района. Этот факт следует связать с термическим воздействием и "потеплением" региона, вызванным его тектономагматической активизацией в палеогене, тепловой потенциал которого все еще остается значительным. В пределах Маданского рудного поля установлены самые высокие современные значения теплового потока в стране [Бояджиев, Гашаров, 2001]. Кроме того, аномально высокие значения тем-

пературы вычислены и для глубинных границ земной коры Конрада и Мохо [Добрев и др., 2005].

Земная кора Центрально-Родопского рудного района, как уже было показано на рис. 3, имеет сложное слоисто-блоковое строение. В южной части сейсмического профиля прослежено несколько геофизических границ, расположенных на различных глубинах. Одна часть прервана, а на глубине 6 км установлен клиновидный участок с повышенной скоростью сейсмических волн 7 км/с. В северной части профиля на этой же глубине располагается такой же слой с повышенной скоростью, который является продолжением клиновидного участка. На глубине 12 км прослеживается сейсмический волновод мощностью более 5 км. Четко и категорически по длине всего профиля зафиксирована планетарная граница Мохо со стандартной скоростью сейсмических волн от 7,8 до 8,0 км/с. Глубина, на которой располагается эта граница, изменяется от 45 севернее Южно-Родопского мантийного разлома до 35—32 км южнее него. В действительности понижение рассматриваемой границы отмечает восточную периферию известной Родопской депрессии по Мохо. Но самым важным в ее поведении является установленная значительная вертикальная амплитуда разрыва в ареале мантийного разлома, которая достигает 13—14 км и совпадает с южной частью Маданского рудного поля. В результате этого разрыва создается пространство градиентных изменений температуры и давления, вследствие которых появляются конвективные движения и активизируются эндогенные процессы, включительно и рудообразующие.

Анализ приведенной характеристики строения земной коры в указанных двух больших рудных районах определенно свидетельствует о том, что она относится к классическому континентальному типу. В этих двух районах прослежена серия субгоризонтальных границ (хотя и разного рода и с различной обоснованностью), как и множество крутых и разно-

направленных разломных нарушений, некоторые из которых проникают и в верхнюю мантию. Самым убедительным способом трассирована планетарная граница Мохо. Причем в пространстве рудных полей она интенсивно прервана и раздроблена, и в этом состоит самая важная ее характеристика. Особенно следует отметить, что вертикальная амплитуда этих разрывов очень большая (около 14 км в Маданском рудном поле, 10 — в Елшицко-Радкинском и 8 — в Елацско-Челопечском). Это и представляет оригинальный результат, полученный на основе непосредственных измерений, а не посредством интерполяции дискретных данных. Взаимодействием разнонаправленных глубокопроникающих разломов установлены тектонические узлы, которые являются существенным элементом строения земной коры, а некоторые из них — и верхней мантии.

Приведенные данные о глубинных структурных элементах земной коры в рассматриваемых рудных районах являются доказательством ее гетерогенного и слоисто-блокового строения. Она определенно имеет трехслойное строение, но с осадочным слоем, отличающимся слишком малой мощностью, максимум до 1,5—3 км, с ограниченным развитием только в депрессионных участках. Остальные два слоя — гранитно-метаморфический или низкоскоростной сейсмический — имеют мощность, как в Центральном Средногории (около 20 км) и в Центральном Родопах (свыше 23 км). Аналогично базальтовый или высокоскоростной слой отличается следующей мощностью: 18—19 км в Средногории и около 30 км в Центральном Родопах. Круто расположенные глубинные разломы дефинируют сегментированное строение коры, разделяя ее на различные ранги блоковых структур. Большая часть этих структур характеризуется специфическим распределением потенциальных аномалий геофизических полей. Для более полной характеристики земной коры следует добавить, что в указанных двух рудных районах она сильно насыщена магматическими образова-

ниями. В Центральном Средногории они представлены, прежде всего, верхнемеловым субдукционным островодужным кальциево-щелочным магматизмом, а в Центральных Родопах — палеогеновым коллизионным, преимущественно кислым магматизмом. Магматические тела верхней части разреза в зависимости от вещественного и фациального состава выявляются в характерных локальных гравитационных и магнитных аномалиях.

Вероятно, в строении земной коры территории рудных районов установлены сейсмические слои с низкими скоростями волн (волноводов), как и такие с повышенной скоростью, которые располагаются на различных глубинных уровнях, но не более 20 км. Их наличие уже не представляет редко встречающийся феномен, так как они являются присущим элементом строения литосферы, о геологической природе которых высказаны различные мнения. Из конкретных данных можно заключить, что эти слои характеризуются сравнительно небольшой мощностью, а некоторые из них становятся клиновидными. Это доказывает, что они имеют ограниченное пространственное развитие. Но существуют и тектонические структуры, в которых они отсутствуют.

Следует отметить, что на указанных графиках рассматриваемых двух геофизических профилей (см. рис. 2 и 3) не отмечены глубинные наклонные границы, но это не означает, что они реально не существуют. Границы такого типа также являются элементами строения земной коры, которые обуславливают формирование в ней клиновидных структур. Возможность их изучения, однако, методами глубинной геофизики все еще ограничена. В результате применения усложненной методики, в некоторых странах (США, Россия и др.) получены положительные результаты в этом направлении. У нас успешный случай достигнут с проведением сейсмического профиля Ардино—Ивайловград, в результате которого намечен Восточно-Родопский глубинный надвиг [Велев и др., 1996].

**Заключение.** Полученные данные о строении земной коры в рассматриваемых крупных рудных районах и, в частности, об элементах, из которых она состоит, отражают, прежде всего, ее современное состояние. Последнее является результатом прошедших в геологической эволюции планеты грандиозных динамических, корообразующих, коропреобразующих и короразрушающих процессов. Среди них по своему значению выделяются тектонический, метаморфический и магматический, а также плотностная дифференциация и теплообразование. В результате проведенных геофизических работ было доказано, что земная кора типично континентальна, с хорошо развитыми гранитно-метаморфическим и базальтовым слоями, а также ограниченным и относительно тонким седиментным слоем. Было установлено наличие низкоскоростных и высокоскоростных сейсмических слоев, которые в отдельных случаях имеют клинообразный характер. Прослежена серия субгоризонтальных границ. Однако за исключением планетарного раздела Мохо почти все они прерваны и очень трудно могут быть обвязаны.

Первый, очень важный оригинальный результат, — это конкретные цифровые данные о большой вертикальной амплитуде разрывов раздела Мохо (от 7—8 до 14—15 км) в исследованных рудных районах. Такая структурная картина строения пространственного ареала раздела земной коры — верхней мантии свидетельствует о градиентных термобарических изменениях и благоприятных физических условиях возникновения конвективных движений. Последние увеличивают интенсивность теплопереноса, катализируют эндогенные процессы, включая и рудообразование, что имеет большое металлогеническое значение.

Другим основным элементом строения земной коры являются различно ориентированные глубинные разломы, включительно и такие, которые проникают в верхнюю мантию. Три из них относятся к продольным субширотным и ограничиваю-

щим первостепенным тектоническим структурам — Маришский шов, Забалканский и Южно-Родопский мантийные разломные зоны. Кроме того, в Центральном Средногории прослежено два мантийных разлома — Южно-Средногорский и Асарел-Медетский. Глубоким проникновением в мантию отличаются две известные субмеридиальные рудоконцентрирующие структуры — Панагюрская и Центрально-Родопская, пересекающие поперечно Альпийский орогенный пояс. Так, в исследованных рудных районах намечается большая густота мантийных разломов в земной коре, особенно в Центральном Средногории, что, по всей вероятности, представляет уникальное явление. Без сомнения, с ними наиболее тесно связаны тектономагматические активации и рудообразующие процессы, достигшие свой апогей в верхнем меле в Центральном Средногории, а в палеогене — в Центральных Родопах. И в этих двух районах существовали необходимые условия для образования крупных мантийных месторождений — большая проницаемость литосферы и значительная продолжительность эндогенных процессов и, прежде всего, магматизации (свыше 20 млн лет).

Третий важный результат проведенных исследований — это следствие выяснения пространственных взаимодействий и взаимоотношений между разнонаправленными мантийными и коровыми разломами, обусловившими формирование ко-

романтийных тектонических узлов. Они обладают специфическими геолого-геофизическими характеристиками, но самая существенная из них — это их высокая эндогенная проницаемость. С ними пространственно ассоциируются самые крупные рудные месторождения цветных металлов в Болгарии. При этом на пересечении Панагюрской рудоконцентрирующей структуры с субширотными Южно-Среднегорским, Медетским и Забалканским мантийными разломами располагаются соответственно Елшицско-Радинское, Асарел-Медетское и Елацско-Челопечское рудные поля. Аналогично в Центральных Родопах в месте пересечения одноименной рудоконцентрирующей структуры с субширотным Южно-Родопским мантийным расколом находится крупнейшее Маданское свинцовоцинковое месторождение. Таким образом, вероятно намечается важнейшая закономерность в размещении крупных мантийных месторождений цветных металлов.

Окончательный и обобщающий вывод на основе упомянутых данных очевидно заключается в следующем: земная кора в границах рассматриваемых крупных эндогенных рудных районов градиентно изменяется, сильно тектонически переработана, глубоко проницаема, интенсивно магмонасыщена и рудоносна. Все это определяет ее самую важную интегральную характеристику.

### Список литературы

- Богданов Б. Медните находища в България. София: Техника, 1987. 387 с.
- Бояджиева К., Гашаров С. Геотермичен каталог на България. Изд. къща "Горекс прес", 2001. 163 с.
- Велев А., Янев И., Боянов И. Строеж на кората на Източните Родопи по данни на сеизмичния профил Ардино—Ивайловград. *Новости в геологията на България, БГД, VI конгрес.* 1996. С. 109—110.
- Вольвовский И., Дачев Хр., Попова О. и др. Строение земной коры территории Болгарии по профилю ГСЗ—МОВЗ Петрич—Никополь. *Бюл. Московского общества любителей природы.* 1985. Т. 60. № 4. С. 38—45.
- Дачев Хр. Строеж на земната кора в България. София: Техника, 1988. 234 с.

- Димитров Р. (ред.). Оловно-цинковите находища в България. София: Техника, 1988. 258 с.
- Димитров Р., Богданов К., Бресковска В. и др. Изотопен състав на сярата в оловно-цинковите и меднорудните находища в България. *Рудообраз. процеси и минерални находища*. 1986. Т. 26. С. 3—21.
- Добрев Т., Йосифов Д., Димовски С. О распределении температур на границе "М" и "К" на территории Болгарии. *Геофиз. журн*. 2005. Т.27. № 5. С. 730—737.
- Йосифов Д. Рудоконцентриращи структури в България. Геология и минерални ресурси. 2007. Т. 6. № 12. С. 12—15.
- Йосифов Д., Радичев Р. Дълбочинен строеж на Панагюрския руден район. *Геология и минерални ресурси*. 2016. № 9-10. С. 29—39.
- Йосифов Д., Радичев Р., Цанков Хр. Дълбочинни структури в Маданското рудно поле и тяхното металогенно значение. *Минно дело и геология*. 2016. № 3-4. С. 32—38.
- Dokov R., Vassileff L., Stajkov M. et al., 1989. Metallogenic map of Bulgaria. 1 : 1 000 000. CIPP in map making. Sofia.

## Earth's crust of large deposits of non-ferrous metals in Bulgaria

© *Dimcho Yosifov, Radi Radichev, 2018*

The proposed publication explores the main results of the study of the Earth's crust in the largest ore regions in Bulgaria — Panagyurishte and Central Rhodopes. The concept of its continental type has been confirmed, and the more significant accomplishments can be summarized as follows. A number of ruptures of the Moho boundary, characterized by considerable vertical amplitude (from 7—8 to 13—14 km) have been proven, which facilitate and catalyze the endogenous processes, including ore formation one. A large (unique) density of the Earth's crust layering in depth has been established. Besides the known mantle faults, limiting the main longitudinal tectonic units (the Maritsa fault zone and the Sub-Balkan fault), two more are identified — the South Sredna Gora and the South-Rhodopes ones. From their intersection with the submeridional ore concentrating structures (the Panagyurishte and the Central-Rhodopes ones) core-mantle nodes are formed and the main ore fields are located in their ranges. As a whole, the Earth's crust in the studied ore regions is characterized by gradient changes in its depth structure, represented by large fragmentation, high endogenous permeability, intensive magma saturation and significant ore-bearing potential.

**Key words:** deep structure, Moho boundary, deep faults, tectonic nodes, metallogeny.

### References

- Bogdanov B., 1987. Copper deposits in Bulgaria. Sofia: Technika, 387 p. (in Bulgarian).
- Boyadzhieva K., Gasharov S., 2001. Geothermal catalog of Bulgaria. Ed. house "Gorex press", 163 p. (in Bulgarian).
- Velev A., Yanev I., Boyanov I., 1996. Structure of the East Rhodopes cortex according to the seismic profile of Ardino—Ivailovgrad. *Novelties in geology of Bulgaria, BG, VI congress*. P. 109—110 (in Bulgarian).

- Volvovskiy I., Dachev Hr., Popova O. et al.*, 1985. The structure of the Earth's crust of the territory of Bulgaria along the profile of the DSS—MRWE Petrich—Nikopol. *Byulleten Moskovskogo obshchestva pol'zovateley prirody* 60 (4), 38—45 (in Russian).
- Dachev Hr.*, 1988. Construction of the Earth's crust in Bulgaria. Sofia: Technika, 234 p. (in Bulgarian).
- Dimitrov R.* (ed.), 1988. Lead-zinc deposits in Bulgaria. Sofia: Technika, 258 pp. (in Bulgarian).
- Dimitrov R., Bogdanov K., Breskovska V. et al.*, 1986. Isotope composition of sulfur in lead-zinc and copper-ore deposits in Bulgaria. *Ore formation processes and mineral deposits* 26, 3—21 (in Bulgarian).
- Dobrev T., Yosifov D., Dimovski S.*, 2005. On the temperature distribution on the border of the "M" and "K" in the territory of Bulgaria. *Geofizicheskiy zhurnal* 27(5), 730—737 (in Russian).
- Yosifov D.*, 2007. Rudoconcentrating structures in Bulgaria. *Geology and mineral resources* 6 (12), 12—15 (in Bulgarian).
- Yosifov D., Radichev R.*, 2016. Depth structure of the Panagyurishte ore region. *Geology and mineral resources* (9-10), 29—39 (in Bulgarian).
- Yosifov D., Radichev R., Tsankov Hr.*, 2016. The Dlbhochinni structure in Madanscoto ore field and is also a meta-not important meaning. *Mining and geology* (3-4), 32—38 (in Bulgarian).
- Dokov R., Vassileff L., Stajkov M. et al.*, 1989. Metallogenic map of Bulgaria. 1 : 1 000 000. CIPP in map making. Sofia.



# Новая технология оценки временных сдвигов при сейсмическом мониторинге эксплуатации нефтегазовых месторождений и подземных газовых хранилищ

© Ю. К. Тяпкин<sup>1</sup>, Е. Ю. Тяпкина<sup>2</sup>, 2018

<sup>1</sup>ООО "Юг-Нефтегазгеология", Киев, Украина

<sup>2</sup>Компания Weatherford, Осло, Норвегия

Поступила 4 декабря 2017 г.

Процес експлуатації нафтогазових родовищ і підземних сховищ природного газу і CO<sub>2</sub> супроводжується змінами в часі фізичних властивостей як самого резервуара, так і товщі, що його перекриває. Вивчення цих змін за допомогою повторних (4D) сейсмічних спостережень дає змогу контролювати ефективність експлуатації нафтогазових родовищ і підземних газових сховищ. Широкий клас методів використовує як проміжну інформацію часові зсуви, що виникають у повторних сейсмічних записах, при вивченні зміни геомеханічних властивостей продуктивного резервуара. У статті сформульовано умови, за яких величини коефіцієнтів відбиття меж у процесі зміни властивостей середовища зберігаються, але зміщуються в нове положення уздовж осі подвійного часу пробігу хвиль. Для оцінювання часових зсувів, що виникають, розроблено нову технологію. Вона заснована на статистичних властивостях функції взаємної кореляції двох обмежених у часі випадкових процесів, один з яких є зрушеним і розтягнутим або стисненим у часі варіантом другого. Запропонована технологія дає змогу одночасно визначити постійну і лінійну складові часових зсувів за достатньої кількості накопичених функцій взаємної кореляції таких процесів. Справедливість теоретичних основ методу підтверджено двома чисельними експериментами. Як джерело вхідних даних, необхідних для застосування даної технології на практиці, запропоновано використовувати випадкову компоненту сейсмічних зображень, породжену хаотичними флуктуаціями акустичного імпедансу в нижньому півпросторі. Описано деякі методи апроксимації регулярної компоненти сейсмічних записів, віднімання якої із записів дасть змогу отримати їх випадкову компоненту, необхідну для функціонування запропонованої технології.

**Ключові слова:** сейсмічний моніторинг, повторні сейсмічні спостереження, часовий зсув, взаємна кореляція, взаємний спектр.

**Введение.** Сейсмический мониторинг процесса эксплуатации нефтегазовых месторождений, называемый в англоязычной литературе seismic time-lapse (4D) monitoring, основан на сопоставлении сейсмических данных, полученных на одной и той же площади с интервалом от нескольких месяцев до нескольких лет [Nguyen

et al., 2015]. Эта технология предназначена решать множество разнообразных задач. Среди них, в первую очередь, следует назвать контроль степени истощения запасов углеводородов и сопровождающих этот процесс изменений внутрипорового давления, состава флюидов и положения контакта флюидов в резер-

вуаре, обнаружение и оконтуривание незатронутых добычей участков залежи (целиков), изучение перемещения газа в вышележащие слои, контроль нагнетания воды, газов и пара для интенсификации процесса добычи. Не менее важной задачей является анализ процесса эксплуатации подземных хранилищ природного газа и  $\text{CO}_2$ . Необходимо отметить, что зарегистрированные в разное время данные требуют специальной обработки, предназначенной устранить все искажения, не связанные непосредственно с изменением физических свойств изучаемого объекта, а вызванные, в первую очередь, разницей в условиях повторных наблюдений [Dinh et al., 2015; Nguyen et al., 2015].

Методы, используемые для оценки изменения свойств интересующего исследователя интервала разреза и перекрывающей толщи, можно условно разделить на два разных класса. Первый из них основан на изучении характеристик временных сдвигов сейсмических записей [Guilbot, Smith, 2002; Hatchell, Bourne, 2005; Rickett et al., 2007; Dybvik et al., 2009; Grandi et al., 2010; Grude et al., 2012; Avseth et al., 2013; Røste et al., 2015]. Второй использует разницы в оценках поглощения волн, динамических характеристик записи, а также петрофизических и геомеханических параметров, полученных в результате сейсмической инверсии [Skov et al., 2002; Buland, El Ouair, 2006; Schutjens et al., 2007; Blanchard et al., 2009; Davis, Benson, 2009; Chadwick et al., 2010; Chen et al., 2010; Grude et al., 2012; Dupuy et al., 2014; Grana, Mukerji, 2015].

Данная статья относится к первому классу. Она посвящена совершенствованию технологии оценки характеристик временных сдвигов, возникающих в сейсмических записях при повторных наблюдениях вследствие изменения физических свойств продуктивного интервала и перекрывающей толщи в процессе эксплуатации нефтегазовых месторождений и подземных газовых хранилищ.

**Модель сейсмической трассы при повторных наблюдениях.** Рассмотрим раз-

ницу между двумя трассами, соответствующими повторным наблюдениям. Для этого воспользуемся следующими тремя формулами [Røste et al., 2006, 2007]:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{\Delta z}{z} - \frac{\Delta v}{v}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{\Delta z}{z}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta v}{v} = \alpha \frac{\Delta z}{z}, \quad (3)$$

где  $t$  и  $v$  — соответственно двойное время пробега и скорость волн в произвольно выбранном слое с мощностью  $z$  и плотностью  $\rho$ , знак  $\Delta$  обозначает изменение соответствующих величин, а  $\alpha < 0$  — параметр расширения, зависящий от свойств породы в выбранном слое.

Другая форма относительного изменения скорости (3) предложена в работе [Hatchell, Bourne, 2005]:

$$\frac{\Delta v}{v} = -R \varepsilon_{zz},$$

где  $\varepsilon_{zz}$  — вертикальное растяжение (деформация), а  $R > 0$  — безразмерный параметр. В этом случае (1) и (2) могут быть представлены так:

$$\frac{\Delta t}{t} = (1 + R) \varepsilon_{zz}, \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = -\varepsilon_{zz}.$$

Предположим, что параметр  $R$  изменяется с глубиной достаточно плавно, т. е. он почти постоянен в пределах скользящего во времени интервала анализа. Естественно, такое основополагающее условие требует дополнительных исследований. Кроме того, необходимо отметить, что величина  $\varepsilon_{zz}$  непрерывна на любой границе. По этим двум причинам

$$\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} = \frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} = c_1, \quad \frac{\Delta v_1}{v_1} = \frac{\Delta v_2}{v_2} = c_2,$$

где  $\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1}$  и  $\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2}$  — соответственно отно-

сительные изменения плотности над и под произвольной границей, а  $\frac{\Delta v_1}{v_1}$  и  $\frac{\Delta v_2}{v_2}$  — соответственно относительные изменения скорости над и под этой же границей.

При таких условиях коэффициент отражения от границы до изменения свойств среды, равный

$$k_{\text{before}} = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2},$$

совпадает с коэффициентом отражения от этой же границы после изменения свойств среды:

$$\begin{aligned} k_{\text{after}} &= \\ &= \frac{\rho_1 (1 + c_1) v_1 (1 + c_2) - \rho_2 (1 + c_1) v_2 (1 + c_2)}{\rho_1 (1 + c_1) v_1 (1 + c_2) + \rho_2 (1 + c_1) v_2 (1 + c_2)} = \\ &= \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2}. \end{aligned}$$

Таким образом, при указанных условиях величины коэффициентов отражения границ в процессе изменения свойств среды сохраняются, но смещаются в новое положение вдоль оси двойного времени пробега волн. Формально это можно представить так:

$$s_1(t) = s_2[t - \Delta(t)], \quad (4)$$

где  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  — соответственно отражательные способности среды до и после изменения ее свойств, а  $\Delta(t)$  — зависящий от двойного времени пробега временной сдвиг между ними.

**Модель временного сдвига.** Обычно предполагается, что величина  $s_1(t)$  изменяется достаточно плавно вдоль оси времени, и поэтому предполагается правомочным считать сдвиг между  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  постоянным в пределах окна анализа. Отсюда следует простейший метод оценки временного сдвига между  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  по поведению максимума их функции взаимной корреляции [Rickett et al., 2007]. Однако такой метод обладает очень низкой

устойчивостью, для повышения которой предлагается осреднение этой функции по нескольким соседним трассам. С этой же целью разработаны и используются более сложные алгоритмы, основанные на оптимизированных решениях обратных задач с ограничениями [Rickett et al., 2007; Lie, 2011], на оценках бикогерентности с использованием кумулянтных функций третьего порядка [Yung, Ikelle, 1997; Naeini, Hoesber, 2008] и на сочетании разложения Тейлора с методом наименьших квадратов [Hatchell et al., 2003; Naeini, Hoesber, 2008].

Если временные сдвиги в перекрывающей толще действительно могут быть плавно изменяющимися функциями времени, то в районе верхней границы эксплуатируемого интервала они обычно изменяются достаточно резко [Avseth et al., 2013; Nguyen et al., 2015; Røste et al., 2015]. В такой ситуации модель постоянного временного сдвига между  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  и вытекающий из нее метод оценки, основанный на функции взаимной корреляции, неправомочны. Поэтому имеет смысл добавить в аппроксимацию временного сдвига в пределах окна анализа линейную составляющую, соответствующую второму члену разложения  $\Delta(t)$  в ряд Тейлора:

$$\Delta(t) = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0), \quad (5)$$

где  $\tau_0 = \Delta(t)|_{t=t_0}$ . Таким образом, в этом случае временной сдвиг  $\Delta(t)$  между  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  характеризуется двумя параметрами —  $\tau_0$  и  $\dot{\tau}$ . Первый из них имеет интегральный характер, поскольку отражает суммарное влияние всей вышележащей толщи. По этой причине он представляет меньший интерес для исследователей по сравнению с  $\dot{\tau}$ , который лучше характеризует и позволяет проинтерпретировать локальный временной сдвиг между  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  [Rickett et al., 2007].

Из-за отсутствия возможности прямо оценить параметр  $\dot{\tau}$  [Rickett et al., 2007] предлагают сначала оценить  $\Delta(t)$  с использованием традиционного метода, основанного на использовании функции взаимной корреляции, а затем выполнить диф-

ференцирование результата по времени. Но, как было отмечено, этот традиционный метод не только неустойчив, но и вряд ли может быть успешно применен в условиях резкой изменчивости поведения  $\Delta(t)$  в пределах анализируемого интервала. Дополнительное сочетание этого метода с неустойчивой процедурой дифференцирования еще больше понижает устойчивость всей технологической схемы в целом. Учитывая присутствие сильных искажений в оценках  $\Delta(t)$ , в работе [Rickett et al., 2007] предлагается перед дифференцированием выполнить тщательную обработку материала, включающую устранение выбросов и последующее сглаживание. Однако такая процедура впоследствии может привести к потере важных деталей в интерпретации общей картины изменения геомеханических свойств среды.

В работе [Fomel, Jin, 2007] предложено предварительно растягивать или сжимать  $s_1(t)$  и затем выбирать такое значение параметра  $\dot{\tau}$ , которое обеспечивает максимальное локальное подобие видоизмененной во времени трассы  $s_1(t)$  и трассы  $s_2(t)$ .

Ниже описан предлагаемый авторами принципиально новый подход к оценке величин  $\tau_0$  и  $\dot{\tau}$ .

**Теория метода.** Пусть на вход процедуры взаимной корреляции (в дальнейшем — коррелятора) поступают два случайных процесса, каждый из которых представляет собой сумму сигнала и шума:

$$u_1(t) = s_1(t) + n_1(t),$$

$$u_2(t) = s_2(t) + n_2(t).$$

Предположим, что, во-первых, оба шума не коррелируются между собой и с сигналами, во-вторых, каждая составляющая имеет нулевое математическое ожидание и, в-третьих, мощности сигналов равны. Условимся также, что сигналы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , как это представлено в уравнении (4), отличаются между собой мгновенной временной задержкой  $\Delta(t)$ , которая на некотором небольшом интервале времени является линейной функцией времени, опи-

сываемой уравнением (5). При этом  $|t - t_0| \leq (T + \tau_{\max})/2$ , где  $T$  — время интегрирования коррелятора, а  $\tau_{\max}$  — максимальное изменение задержки.

В общем случае результат на выходе коррелятора изменяется во времени, поскольку от времени зависит задержка  $\Delta(t)$ . Однако можно считать, что в момент  $t = t_0$  функция взаимной корреляции не зависит от времени и определяется так:

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{1}{2}T}^{t_0 + \frac{1}{2}T} u_2(t) u_1(t + \tau) dt. \quad (6)$$

Ввиду конечного времени интегрирования  $T$  функция  $R(\tau)$  носит случайный характер и поэтому должна быть оценена статистически. С этой целью имеет смысл определить ее математическое ожидание, т. е. выполнить осреднение этой функции по бесконечному ансамблю независимых реализаций, полученных в одинаковых условиях. При этом вследствие начального предположения о некоррелируемости обоих шумов между собой и с сигналами выражение (6) сводится к взаимной корреляции между сигналами  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ :

$$E \{R(\tau)\} = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{1}{2}T}^{t_0 + \frac{1}{2}T} E \{s_2(t) s_1(t + \tau)\} dt,$$

где  $E$  — оператор взятия математического ожидания. Выполнение этой операции и последующий переход в спектральную область позволили получить следующее выражение взаимного спектра мощности двух сигналов [Remley, 1963]:

$$R(\omega) = \quad (7)$$

$$= P(\omega) \frac{\sin\{\omega \dot{\tau} T / [2(1 - \dot{\tau})]\}}{\omega \dot{\tau} T / [2(1 - \dot{\tau})]} \exp\left(-\frac{i\omega\tau_0}{1 - \dot{\tau}}\right),$$

где  $P(\omega)$  — спектр мощности недеформированного во времени сигнала  $s_1(t)$ .

Когда скорость изменения временной задержки равна нулю ( $\dot{\tau} = 0$ ), взаимный спектр (7) приобретает традиционный вид:

$$R(\omega) = P(\omega) \exp(-i\omega\tau_0).$$

Если параметры  $\tau_0$  и  $\dot{\tau}$  являются искомыми, они могут быть оценены по методу наименьших квадратов с использованием отношения спектров на выходе коррелятора:

$$\frac{R(\omega)}{P(\omega)} = \quad (8)$$

$$= \frac{\sin\{\omega\dot{\tau}T / [2(1-\dot{\tau})]\}}{\omega\dot{\tau}T / [2(1-\dot{\tau})]} \exp\left(-\frac{i\omega\tau_0}{1-\dot{\tau}}\right).$$

**Модельный эксперимент.** Он выполнялся по схеме, изображенной на рис. 1, и был предназначен показать зависимость отношения взаимного спектра мощности трасс  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  к спектру мощности трассы  $s_1(t)$  от количества используемых независимых реализаций случайного процесса. При этом для моделирования очередной реализации трассы  $s_1(t)$  использовался один из генераторов псевдослучайных чисел (подпрограмма RNUM/DRNUM из библиотеки Math Library IMSL для Microsoft Fortran Power Station). Для получения из трассы  $s_1(t)$  трассы  $s_2(t)$  с линейно изменяющейся во времени задержкой  $\Delta(t)$  применялась интерполяционная формула Уиттекера—Шеннона (Котельникова) [Franks, 1969].

На рис. 2 представлен нормированный взаимный спектр мощности  $R(\omega)/P(\omega)$  для  $T = 1$  с,  $\tau_0 = 0$ , произвольно выбранной величины  $\dot{\tau} = 0,01771$  и разного количества использованных независимых реализаций псевдослучайного процесса, имитирующих трассу  $s_1(t)$ . Рисунок демонстрирует полное отсутствие какой-либо закономерности в поведении взаимного спектра при использовании только одной реализации, что еще раз свидетельствует о неустойчивости процедуры оценки временных сдвигов с использованием функции взаимной корреляции. Этот недостаток, несомненно, дополнительно усугубляется по мере роста  $\dot{\tau}$ . С увеличением



Рис. 1. Блок-схема модельного эксперимента, предназначенного показать зависимость отношения взаимного спектра мощности трасс  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  к спектру мощности трассы  $s_1(t)$  от количества используемых реализаций случайного процесса.

количества использованных реализаций псевдослучайного процесса дисперсия получаемой оценки нормированного взаимного спектра мощности монотонно уменьшается и оценка стремится к предельному аналитическому виду, описываемому уравнением (8).

Влияние десятикратного увеличения скорости изменения временной задержки ( $\dot{\tau} = 0,1771$ ) при прочих равных условиях на поведение нормированного взаимного спектра мощности показано на рис. 3.

Здесь в целом наблюдается та же закономерность, что на рис. 2. Однако при этом кривая (8) значительно быстрее уменьшается по амплитуде в выбранном диапазоне частот 0—250 Гц и, следовательно, значительно хуже проявляется на высоких частотах при той же дисперсии оценок взаимного спектра мощности. Поэтому в данном случае для более надежной оценки взаимного спектра во всем

диапазоне частот требуется значительно большее количество независимых реализаций псевдослучайного процесса.

**Источник входных данных для реализации предлагаемой технологии на практике.** Описанный метод предполагает использование достаточно большого количества независимых реализаций случайного процесса для получения надежных оценок нормированного взаимного спек-

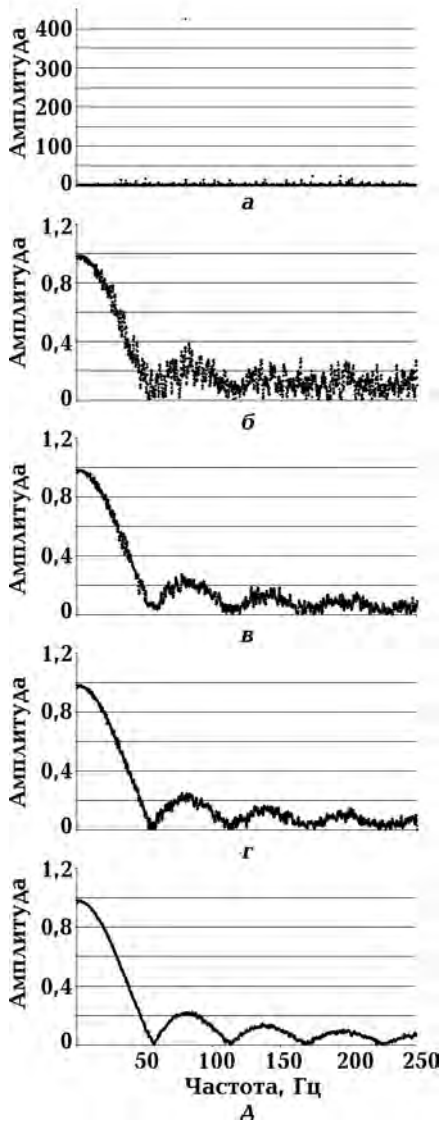


Рис. 2. Зависимость нормированного взаимного спектра мощности  $R(\omega) / P(\omega)$  при  $T = 1$  с,  $\tau_0 = 0$  и  $\hat{\tau} = 0,01771$  от количества использованных независимых реализаций псевдослучайного процесса, имитирующих трассу  $s_1(t)$ : а — 1, б — 100, в — 500, г — 1000, д — 10 000.

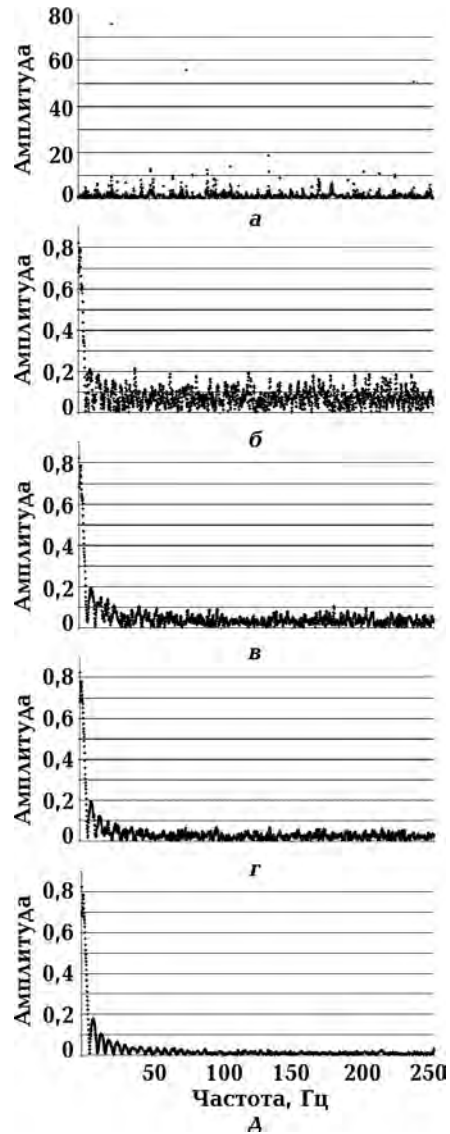


Рис. 3. Зависимость нормированного взаимного спектра мощности  $R(\omega) / P(\omega)$  при  $T = 1$  с,  $\tau_0 = 0$  и  $\hat{\tau} = 0,1771$  от количества использованных независимых реализаций псевдослучайного процесса, имитирующих трассу  $s_1(t)$ : а — 1, б — 100, в — 500, г — 1000, д — 10 000.

ра соответствующих трасс повторных сейсмических наблюдений. Только в таком случае возможна надежная оценка интересующих нас параметров  $\tau_0$  и  $\dot{\tau}$ . Однако для этой цели не могут быть использованы наборы смежных трасс обычных сейсмических изображений, поскольку они в значительной степени статистически зависимы. Поэтому для предлагаемой технологии имеет смысл вместо самих сейсмических изображений использовать их случайные компоненты, порожденные хаотическими флуктуациями акустического импеданса в нижнем полупространстве.

Если отражающие границы в пределах изучаемого интервала локально параллельны,  $i$ -я трасса сейсмической записи может быть аппроксимирована моделью

$$u_i(t) = a_i s(t) + \xi_i(t) + n_i(t). \quad (9)$$

Здесь сигнальная компонента, представленная первым членом в правой части уравнения (9), имеет постоянную форму  $s(t)$  и произвольную амплитуду  $a_i$  на разных каналах,  $\xi_i(t)$  — независимая от сигнальной компоненты случайная составляющая записи, вызванная пространственными вариациями акустического импеданса и подверженная, как и сигнал, временным деформациям на повторных наблюдениях, а  $n_i(t)$  — случайный аддитивный шум, не зависящий от  $s(t)$  и  $\xi_i(t)$ . Если  $\xi_i(t)$  и  $n_i(t)$  имеют независимые от номера трассы  $i$  дисперсии, они могут быть получены в результате вычитания из записи ее регулярной компоненты  $a_i s(t)$  аппроксимацией наиболее энергетически выраженным членом сингулярного разложения. Этот метод предложен в работе [Туаркин et al., 2004] для аппроксимации и вычитания регулярных поверхностных волн. При умеренной несогласованности в поведении отражающих границ изображение может быть предварительно локально "кондиционировано" для приведения в соответствие с требованиями такого метода, например, применением технологии, описанной в работах [Туаркин et al., 2004; Туаркина et al., 2013].

Если есть подозрение, что сейсмическое

изображение недостаточно эффективно мигрировано и поэтому в нем присутствуют остаточные (недофокусированные) дифрагированные волны, для вычитания регулярной компоненты может быть использована технология, описанная в работе [Fomel et al., 2006]. Она базируется на разрушающих плоские волны пространственных фильтрах и одновременно позволяет оптимизировать скорость миграции для получения более эффективно сейсмического изображения.

Анализ рис. 2 позволяет сделать вывод, что уже при использовании 500—1000 реализаций оценка нормированного взаимного спектра обладает весьма низкой относительной дисперсией и хорошо аппроксимирует предельный случай, описываемый уравнением (8). Для получения такого количества реализаций при уже ставших традиционными 3D наблюдениях может быть использован куб сейсмического изображения, содержащий 23—32 смежные трассы по каждому из ортогональных направлений. При достаточно плотной сети наблюдений это может существенно снизить разрешающую способность технологии по латерали.

Поскольку трассы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  предполагаются удовлетворяющими уравнению (4), перед расчетами путем деконволюции они должны быть максимально приближены к соответствующим последовательностям коэффициентов отражения.

**Выводы.** Разработана новая технология оценки временных сдвигов, возникающих в сейсмических записях при повторных наблюдениях вследствие изменения физических свойств продуктивного интервала и перекрывающей толщи, сопровождающего процесс эксплуатации нефтегазовых месторождений и подземных газовых хранилищ. Она основана на статистических свойствах функции взаимной корреляции двух ограниченных во времени случайных процессов, один из которых представляет собой сдвинутый и растянутый или сжатый во времени вариант второго. Предлагаемая технология позволяет одновременно определить по-

стоянную и линейную составляющие временных сдвигов при достаточном количестве накопленных функций взаимной корреляции таких процессов. Справедливость теоретических основ метода подтверждена двумя численными экспериментами. В качестве источника входных данных, необходимых для применения данной технологии на практике, предложено использовать случайную компонен-

ту сейсмических изображений, порожденную хаотическими флуктуациями акустического импеданса в нижнем полупространстве. Описаны некоторые методы аппроксимации регулярной компоненты сейсмических записей, вычитание которой из записей позволяет получить их случайную компоненту, необходимую для функционирования предлагаемой технологии.

### Список литературы

- Avseth P., Skjei N., Skålnes Å., 2013. Rock physics modelling of 4D time-shifts and time-shift derivatives using well log data — a North Sea demonstration. *Geophys. Prosp.* 61 (2), 380—390. doi: 10.1111/j.1365-2478.2012.01134.x.
- Blanchard T. D., Clark R. A., van der Baan M., Laws E., 2009. Time-lapse attenuation as a tool for monitoring pore fluid changes in hydrocarbon reservoirs. *71<sup>st</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper PO52. doi: 10.3997/2214-4609-201400042.
- Buland A., El Ouair Y., 2006. Bayesian time-lapse inversion. *Geophysics*, 71 (3), R43—R48. doi: 10.1190/1.2196874.
- Chadwick A., Williams G., Delepine N., Clochard V., Labat K., Sturton S., Buddensiek M., Dillen M., Nickel M., Lima A. L., Arts R., Neele F., Rossi G., 2010. Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO<sub>2</sub> storage operation. *The Leading Edge*, 29 (2), 170—177. doi: 10.1190/1.3304820.
- Chen S.-Q., Chadwick A., Li X.-Y., 2010. CO<sub>2</sub> injection induced dispersion and attenuation. *80<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 2527—2531. doi: 10.1190/1.3513363.
- Davis T. L., Benson R. D., 2009. Tight-gas seismic monitoring, Rulison Field, Colorado. *The Leading Edge*, 28 (4), 408—411. doi: 10.1190/1.3112753.
- Dinh H., van der Baan M., Landrø M., 2015. Time-lapse processing strategies for detecting 4D attenuation changes and shallow gas movement. *77<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper Th N101 08. doi: 10.3997/2214-4609-201413165.
- Dupuy B., Balhareth H. M., Landrø M., Stovas A., 2014. Estimation of rock physics properties and gas saturation from time-lapse full waveform inversion data. *76<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*. Paper Tu P11 11. doi: 10.3997/2214-4609.20140932.
- Dybvik O. P., Gemmer L., Theune U., Østmo S., 2009. Establishing a geomechanical workflow for time-lapse modeling of an HPHT field. *71<sup>st</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper P343. doi: 10.3997/2214-4609.201400229.
- Fomel S., Jin L., 2007. Time-lapse image registration using the local similarity attribute. *77<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 2979—2983. doi: 10.1190/1.2793090.
- Fomel S., Landa E., Taner M., 2006. Post-stack velocity analysis by separation and imaging of seismic diffractions. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 2559—2563. doi: 10.1190/1.2370052.
- Franks L. E., 1969. *Signal theory*. Englewood Cliffs. New York: Prentice-Hall, 317 p.
- Grana D., Mukerji T., 2015. Bayesian inversion of time-lapse seismic data for the estimation of static reservoir properties and dynamic property changes. *Geophys. Prosp.* 63 (3), 637—655. doi: 10.1111/1365-2478.12203.
- Grandi A., Rahmanov O., Neillo V., Bourgeois F., Deplante C., Ben-Brahim L., 2010. Time-lapse



- monitoring of the Elgin HPHT Field. 72<sup>nd</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, Paper B040. doi: 10.3997/2214-4609.201400648.
- Grude S., Landrø M., Osdal B., 2012. Time-lapse pressure-saturation discrimination for CO<sub>2</sub> storage at the Snohvit field. 82<sup>nd</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 1—5. doi: 10.1190/segam2012-0841.1.
- Guilbot J., Smith B., 2002. 4D constrained depth conversion for reservoir compaction estimation: Application to Ekofisk Field. *The Leading Edge* 21(3), 302—308. doi: 10.1190/1.1463782.
- Hatchell P.J., van den Beukel A., Molenaar M.M., Maron K.P., Kenter C.J., Stammeijer J.G.F., van der Velde J.J., Sayers C.M., 2003. Whole earth 4D: Reservoir monitoring geomechanics. 73<sup>rd</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 1330—1333. doi: 10.1190/1.1817532.
- Hatchell P., Bourne S., 2005. Rocks under strain: Strain-induced time-lapse time-shifts are observed for depleting reservoirs. *The Leading Edge* 24(12), 1222—1225. doi: 10.1190/1.2149624.
- Lie E. O., 2011. Constrained time-shift estimation. 73<sup>rd</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, Paper G038. doi: 10.3997/2214-4609.20149239.
- Naeini E. Z., Hoesber H., 2008. Improved time delay estimation. 70<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, Paper B068. doi: 10.3997/2214-4609.20147879.
- Nguyen P.K.T., Nam M.J., Park C., 2015. A review on time-lapse seismic data processing and interpretation. *Geosci. J.* 19(2), 375—392. doi: 10.1007/s12303-014-0054-2.
- Remley W., 1963. Correlation of signals having a linear delay. *J. Acoust. Soc. Am.* 35(1), 65—69. doi: 10.1121/1.1918415.
- Rickett J., Duranti L., Hudson T., Regel B., Hodgson N., 2007. 4D time strain and the seismic signature of geomechanical compaction at Genesis. *The Leading Edge* 26(5), 644—647. doi: 10.1190/1.2737103.
- Røste T., Stovas A., Landrø M., 2006. Estimation of layer thickness and velocity changes using 4D pres-tack seismic data. *Geophysics* 71(6), S219—S234. doi: 10.1190/1.2335657.
- Røste T., Landrø M., Hatchell P., 2007. Monitoring overburden layer changes and fault movements from time-lapse seismic data. 69<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, Paper HO19. doi: 10.3997/2214-4609.201401685.
- Røste T., Dybvik O.P., Søreide O.K., 2015. Overburden 4D time-shifts induced by reservoir compaction at Snorre field. *The Leading Edge* 34(11), 1366—1374. doi: 10.1190/tle34111366.1.
- Schutjens P.M.T.M., Burrell R., Fehmers G., Hindriks K., Collins C., van der Horst J., 2007. On the stress change in overburden resulting from reservoir compaction: Observations from two computer models and implications for 4D seismic. *The Leading Edge* 26(5), 628—634. doi: 10.1190/1.2737121.
- Skov T., Borgos H.G., Halvorsen K.E., Randen T., Sunneland L., Arts R., Chadwick A., 2002. Monitoring and characterization of a CO<sub>2</sub> storage site. 72<sup>nd</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 1669—1672. doi: 10.1190/1.1816997.
- Tiapkina O., Landrø M., Tyapkin Y., 2013. Ground-roll subtraction from common-shot gathers with significant trace-to-trace variations in the energy of random noise. *J. Geophys. Eng.* 10(6). doi: 10.1088/1742-2132/10/6/065001.
- Tyapkin Y.K., Marmalyevskyy N.Y., Gornyak Z.V., 2004. Suppression of source-generated noise using the singular value decomposition. 66<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts, Paper D028.
- Yung S.R., Ikelle L.T., 1997. An example of seismic time picking by third-order bicoherence. *Geophysics* 62(6), 1947—1951. doi: 10.1190/1.1444295.

# A new technology for estimating time-shifts in seismic monitoring of the exploitation of oil and gas fields and underground gas storage sites

© Yu. K. Tyapkin, O. Yu. Tyapkina, 2018

The process of exploitation of oil and gas fields and underground natural gas and CO<sub>2</sub> storage facilities is accompanied by time-dependent changes in the physical properties of both the reservoir itself and the overburden. The study of these changes via time-lapse (4D) seismic allows controlling the efficiency of operation of oil and gas fields and underground gas storage facilities. A wide class of methods uses, as intermediate information, time-shifts arising in time-lapse seismic data when studying the changes in the geomechanical properties of a reservoir. In this paper, conditions are formulated under which the values of the reflection coefficients of boundaries when changing the properties of a medium are preserved, but shifted to a new position along the two-way traveltimes axis. To assess the time-shifts that arise in this way, a new technology is developed. It is based on the statistical properties of the cross-correlation function of two time-limited random processes one of which is a shifted and stretched or compressed in time variant of the other. The proposed technology allows the constant and linear components of the time-shifts to be determined simultaneously when the number of accumulated cross-correlation functions of such processes is sufficient. The validity of the theoretical foundations of the method is confirmed by two numerical experiments. As a source of input data required for the application of this technology in practice, it is suggested to use a random component of seismic images generated by chaotic fluctuations in the acoustic impedance in the lower half-space. Some methods for approximating the regular component of seismic records are described. Subtracting this component from the record allows its random component, which is necessary for the implementation of the proposed technology in practice, to be obtained.

**Key words:** seismic monitoring, time-lapse seismic, time-shift, cross-correlation, cross-spectrum.

## References

- Avseth P., Skjei N., Skålnes Å., 2013. Rock physics modelling of 4D time-shifts and time-shift derivatives using well log data — a North Sea demonstration. *Geophys. Prosp.* 61 (2), 380—390. doi: 10.1111/j.1365-2478.2012.01134.x.
- Blanchard T. D., Clark R. A., van der Baan M., Laws E., 2009. Time-lapse attenuation as a tool for monitoring pore fluid changes in hydrocarbon reservoirs. *71<sup>st</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper PO52. doi: 10.3997/2214-4609-201400042.
- Buland A., El Ouair Y., 2006. Bayesian time-lapse inversion. *Geophysics*, 71 (3), R43—R48. doi: 10.1190/1.2196874.
- Chadwick A., Williams G., Delepine N., Clochard V., Labat K., Sturton S., Buddensiek M., Dillen M., Nickel M., Lima A. L., Arts R., Nelele F., Rossi G., 2010. Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO<sub>2</sub> storage operation. *The Leading Edge*, 29 (2), 170—177. doi: 10.1190/1.3304820.
- Chen S.-Q., Chadwick A., Li X.-Y., 2010. CO<sub>2</sub> injection induced dispersion and attenuation. *80<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 2527—2531. doi: 10.1190/1.3513363.
- Davis T. L., Benson R. D., 2009. Tight-gas seismic monitoring, Rulison Field, Colorado. *The Leading Edge*, 28 (4), 408—411. doi: 10.1190/1.3112753.
- Chadwick A., Williams G., Delepine N., Clochard V., Labat K., Sturton S., Buddensiek M., Dillen M., Nickel M., Lima A. L., Arts R., Nelele F., Rossi G., 2010. Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO<sub>2</sub> storage operation. *The Leading Edge*, 29 (2), 170—177. doi: 10.1190/1.3304820.
- Dinh H., van der Baan M., Landrø M., 2015.

- Time-lapse processing strategies for detecting 4D attenuation changes and shallow gas movement. *77<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper Th N101 08. doi: 10.3997/2214-4609-201413165.
- Dupuy B., Balhareth H. M., Landrø M., Stovas A., 2014. Estimation of rock physics properties and gas saturation from time-lapse full waveform inversion data. *76<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*. Paper Tu P11 11. doi: 10.3997/2214-4609.20140932.
- Dybvik O. P., Gemmer L., Theune U., Østmo S., 2009. Establishing a geomechanical workflow for time-lapse modeling of an HPHT field. *71<sup>st</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper P343. doi: 10.3997/2214-4609.201400229.
- Fomel S., Jin L., 2007. Time-lapse image registration using the local similarity attribute. *77<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 2979—2983. doi: 10.1190/1.2793090.
- Fomel S., Landa E., Taner M., 2006. Post-stack velocity analysis by separation and imaging of seismic diffractions. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 2559—2563. doi: 10.1190/1.2370052.
- Franks L. E., 1969. *Signal theory*. Englewood Cliffs. New York: Prentice-Hall, 317 p.
- Grana D., Mukerji T., 2015. Bayesian inversion of time-lapse seismic data for the estimation of static reservoir properties and dynamic property changes. *Geophys. Prosp.* 63 (3), 637—655. doi: 10.1111/1365-2478.12203.
- Grandi A., Rahmanov O., Neillo V., Bourgeois F., Deplante C., Ben-Brahim L., 2010. Time-lapse monitoring of the Elgin HPHT Field. *72<sup>nd</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper B040. doi: 10.3997/2214-4609.201400648.
- Grude S., Landrø M., Osdal B., 2012. Time-lapse pressure-saturation discrimination for CO<sub>2</sub> storage at the Snohvit field. *82<sup>nd</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 1—5. doi: 10.1190/segam2012-0841.1.
- Guilbot J., Smith B., 2002. 4D constrained depth conversion for reservoir compaction estimation: Application to Ekofisk Field. *The Leading Edge* 21 (3), 302—308. doi: 10.1190/1.1463782.
- Hatchell P. J., van den Beukel A., Molenaar M. M., Maron K. P., Kenter C. J., Stammeijer J. G. F., van der Velde J. J., Sayers C. M., 2003. Whole earth 4D: Reservoir monitoring geomechanics. *73<sup>rd</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 1330—1333. doi: 10.1190/1.1817532.
- Hatchell P., Bourne S., 2005. Rocks under strain: Strain-induced time-lapse time-shifts are observed for depleting reservoirs. *The Leading Edge* 24 (12), 1222—1225. doi: 10.1190/1.2149624.
- Lie E. O., 2011. Constrained time-shift estimation. *73<sup>rd</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper G038. doi: 10.3997/2214-4609.20149239.
- Naeini E. Z., Hoerber H., 2008. Improved time delay estimation. *70<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper B068. doi: 10.3997/2214-4609.20147879.
- Nguyen P. K. T., Nam M. J., Park C., 2015. A review on time-lapse seismic data processing and interpretation. *Geosci. J.* 19 (2), 375—392. doi: 10.1007/s12303-014-0054-2.
- Remley W., 1963. Correlation of signals having a linear delay. *J. Acoust. Soc. Am.* 35 (1), 65—69. doi: 10.1121/1.1918415.
- Rickett J., Duranti L., Hudson T., Regel B., Hodgson N., 2007. 4D time strain and the seismic signature of geomechanical compaction at Genesis. *The Leading Edge* 26 (5), 644—647. doi: 10.1190/1.2737103.
- Røste T., Stovas A., Landrø M., 2006. Estimation of layer thickness and velocity changes using 4D pre-stack seismic data. *Geophysics* 71 (6), S219—S234. doi: 10.1190/1.2335657.
- Røste T., Landrø M., Hatchell P., 2007. Monitoring overburden layer changes and fault movements from time-lapse seismic data. *69<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper HO 19. doi: 10.3997/2214-4609.201401685.
- Røste T., Dybvik O. P., Søreide O. K., 2015. Overburden 4D time-shifts induced by reservoir compaction at Snorre field. *The Leading Edge* 34 (11), 1366—1374. doi: 10.1190/tle34111366.1.
- Schutjens P. M. T. M., Burrell R., Fehmers G.,

- Hindriks K., Collins C., van der Horst J., 2007.* On the stress change in overburden resulting from reservoir compaction: Observations from two computer models and implications for 4D seismic. *The Leading Edge* 26(5), 628—634. doi: 10.1190/1.2737121.
- Skov T., Borgos H.G., Halvorsen K.E., Randen T., Sunneland L., Arts R., Chadwick A., 2002.* Monitoring and characterization of a CO<sub>2</sub> storage site. *72<sup>nd</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 1669—1672. doi: 10.1190/1.1816997.
- Tiapkina O., Landrø M., Tyapkin Y., 2013.* Gro-und-roll subtraction from common-shot gathers with significant trace-to-trace variations in the energy of random noise. *J. Geophys. Eng.* 10(6). doi: 10.1088/1742-2132/10/6/065001.
- Tyapkin Y.K., Marmalyevskyy N.Y., Gornyak Z. V., 2004.* Suppression of source-generated noise using the singular value decomposition. *66<sup>th</sup> EAGE Conference, Extended Abstracts*, Paper D028.
- Yung S.R., Ikelle L. T., 1997.* An example of seismic time picking by third-order bicoherence. *Geophysics* 62(6), 1947—1951. doi: 10.1190/1.1444295.

# Implication of satellite images in studying potential hydrocarbon resources in the licence Blocks 9 and 11, the exclusive economic zones of Egypt and Cyprus

© O.M. Rusakov<sup>1</sup>, I.N. Korchagin<sup>1</sup>, N.A. Yakymchuk<sup>2,3</sup>, S.P. Levashov<sup>2,3</sup>,  
V.D. Soloviev<sup>1</sup>, D.N. Bozhezha<sup>3</sup>, 2018

<sup>1</sup>Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Applied Ecology, Geophysics and Geochemistry, Kiev, Ukraine

<sup>3</sup>Management and Marketing Center of Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Received 30 November 2017

Використано частотно-резонансну технологію для обробки і декодування супутникових знімків ліцензійних блоків 9 і 11 у Східному Середземномор'ї. У досліджуваному районі виявлено аномалії типу "нафта і газ". Супергігантське газове родовище Зохр зумовлює чітку аномалію площею 251 км<sup>2</sup>. Цій аномалії відповідає наявність каналів вертикальної міграції глибоких вуглеводневих флюїдів і горизонтальний градієнт пластового тиску в резервуарі родовища. Вперше запропоновано використовувати ці дві характерні особливості як індикатори рентабельності перспективної структури. На їх основі для розвідувального буріння було рекомендовано кілька аномалій типу "нафта і газ" у блоках 9 і 11. Наявна інформація не дає змоги розглядати перспективну структуру Онісіфор як рентабельне газове родовище. Силіцикlastична і карбонатна моделі розвідувальних робіт однаковою мірою ефективні у єгипетській, кіпрській та ізраїльській ексклюзивних економічних зонах. У них абіогенний метан є основним компонентом газу, що піднімається до пасток з глибших шарів. Вибір оптимального місцеположення буріння потребує міждисциплінарного підходу.

**Ключові слова:** конус виносу Нілу, басейн Левіант, декодування супутникових знімків, класифікація перспективних структур, походження вуглеводнів.

**Introduction.** The Eastern Mediterranean is one of the world's most attractive areas for hydrocarbons exploration due to numerous gas fields and discoveries (Fig. 1) and an acceptable rate of drilling success [Gardosh, 2016]. The USGS estimated technically recoverable gas reserves at about 6.2 and 4.0 trillion cubic meters (TCM) in the Nile Delta Basin Province and Levant Basin Province, respectively [Kirschbaum et al., 2010; Schenk et al., 2010]. The total reser-

ves of 10.2 TCM are enough to supply the worldwide consumption for about 2.5 years at a mean rate of expenditure in 2014–2016 [BP Statistical ..., 2017].

Based on the results from the Abu Madi, El Tamsah, Ha'py, Roseta, Roven, Atoll (Egyptian EEZ), Tamar, Leviathan, Dalit, Dolphin, Noa, Tanin, Pinnacles and Karish (Israeli EEZ) gas fields, exploration targeted Oligocene-Pliocene siliciclastic plays in the EEZs. The biggest Egyptian Atoll field con-

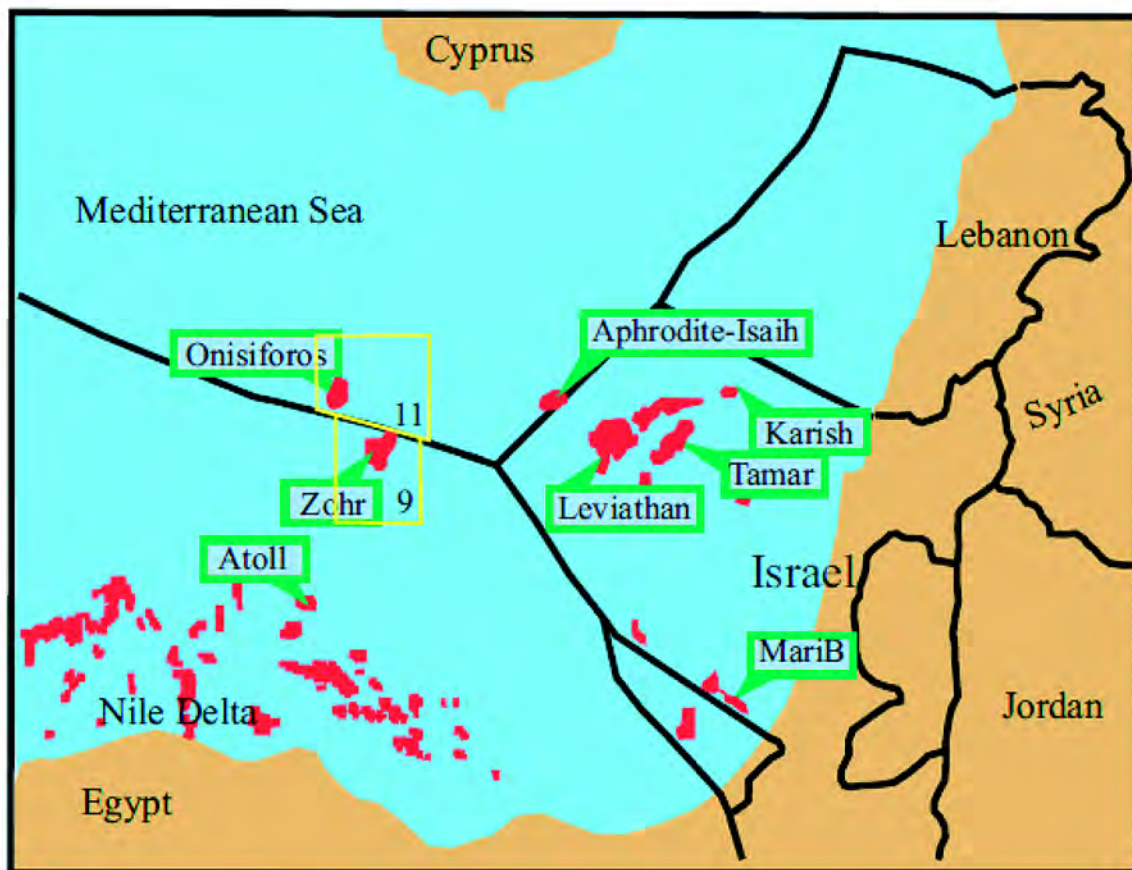


Fig. 1. Location of the hydrocarbon fields and discoveries of the Egyptian, Israeli and Cypriot EEZs in the Eastern Mediterranean [Kirschbaum et al., 2010; Esestime et al., 2016]. 9 and 11 are numbers of the Blocks 9 and 11.

tains 42 billion cubic meters (BCM) of gas and 4.3 billion metric tons (BMT) of condensate [Atoll ..., 2016].

In 2015 the supergiant Zohr gas field was discovered whose probable reserves are 845

BCM. As gas is concentrated in the Early to Middle Miocene coral reefs at the base of the thick carbonate platform in the Egyptian EEZ, the exploration programmes of this field discoverer were increasingly shifted

**T a b l e 1. Major gas fields in the siliciclastic reservoirs [Ellinas et al., 2016; Atoll ..., 2016]**

Fields	Probable reserves (BCM, BMT)	Discovery date	Status
Aphrodite (gas)	128	2011	Pursuing gas sales
Tamar (gas)	280	2009	Producing
Leviathan (gas)	620	2010	Pursuing gas sales
Zohr (gas)	845	2015	Pursuing gas sales
Atoll (gas) (condensate)	42 4.3	2015	Start of production, 2018

towards searching for large limestone build-ups in the Levantine platform in the area south of Cyprus where the Miocene paleo-lagoons are widespread. After intensive seismic campaign an inference was made that in the Cypriot EEZ there's a similar to the Zohr type hypergigantic reserve which is estimated as, at least 5 times, greater than Zohr [Conophagos et al., 2016]. Consequently, the carbonate build-up was drilled by Onisiforos W-1 well in the B11, just near the Zohr field. Drilling the well was completed (September, 2017) with the shocking results [Paraskova, 2017]. The Onisiforos gas field is not commercially viable because its reserves are ca.14 BCM that is 60 times less than in the Zohr field. Nevertheless, Cypriot Energy Minister Giorgos Lakkotrypys considers the results encouraging because they

confirm the working of the geological model of Zohr that makes it possible to continue exploration activity in the frame of this concept. However, the only way to minimize exploration risk is to include direct methods of hydrocarbon prospecting into multidisciplinary geological-geophysical works.

The aim of this investigation is to perform the case study from the Zohr field (Egyptian EEZ) with use of the frequency-resonance technology (FRT) for processing and decoding the satellite images and to apply results to recommend sites for exploration drilling in the Blocks 9 (B9) and 11 (B11) of the Eastern Mediterranean Sea.

**Material and method.** The geological sketch of the Zohr field was based on the interpretation of the seismic line (Fig. 2, *a*, *b*). The field is the biggest in the Eastern Mediter-

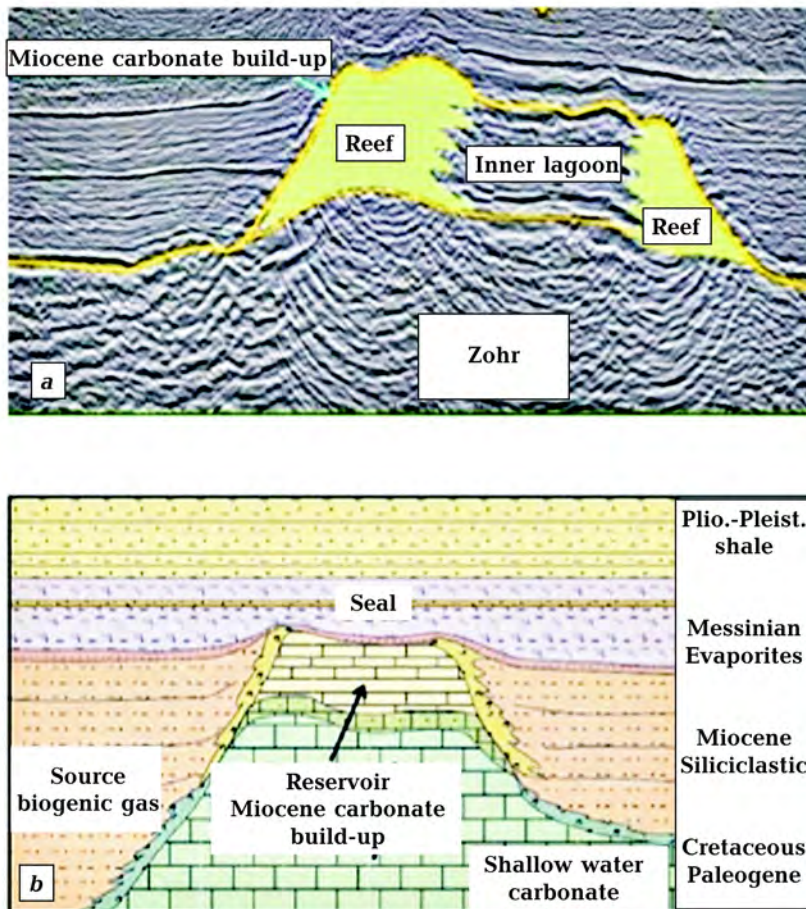


Fig. 2. Seismic line across the Zohr gas field (*a*) and its geological sketch (*b*) [Esestime, 2016; Gardosh, 2016].

anean. It is situated at a water depth of 1450 m near Egyptian-Cypriot limit of the EEZs [Esestime et al., 2016]. The exploration well was drilled to 4131 m. The structure occupies 100 km<sup>2</sup> with the thickness of gross gas column of 628 m. The gas recoverable reserves are 845 BCM. The field reservoir is a porous carbonate built-up of the Early to Middle Miocene age at the base of a thick sequence of Messinian evaporites within the Levantine Platform. Gas is suggested to be biogenic migrated from Cenozoic source rocks, which are sealed by the Messinian Evaporitic complex.

The propriety FRT is used for processing and decoding the satellite images of the B9 and B11. Its various aspects are described in a number of publications, including [Levashov et al., 2011, 2012, 2017a]. Here are only the basic principles for the concept of direct hydrocarbon search and exploration to get a clear idea of it without addressing other sources.

The novel technology is based on the generally accepted fact that each kind of molecules has own strict resonance frequencies of electromagnetic field radiation [Hedvig, 1975]. The frequency of any matter is governed by the chemical composition and molecular structure or spatial lattice of material. This phenomenon is tested by experiments in laboratory. One of the numerous examples is presented in Table 2.

An accumulation of homogenous material creates a characteristic frequency of electromagnetic radiation whose intensity is proportional to the amount of material. At the

Earth's surface the modulated signals of a characteristic frequency contain proper information on the structure, quantity and composition of the material which after discriminating can be used to uniquely identify matter of interest. The carrier signals are modulated by low frequency electromagnetic and seismo-magnetic signals of the lithospheric origin including those from hydrocarbon fields [Shuman, 2007]. A technique of determining reservoir pressure was developed by experiments on the known hydrocarbon fields. A new terminology was introduced to classify the results of remote sensing: the anomalous zones of "gas deposit", "oil reservoir", "gas-condensate accumulation" and "oil and gas occurrence" types. It's worth mentioning that these zones themselves don't necessarily indicate commercial hydrocarbon accumulation.

For frequency-resonance processing the multispectral images are used from different satellites which are in the public domain. The images of Landsat 5 and Landsat 7 with a resolution of 30 m/pixel are used to performing reconnaissance surveys of large areas and to processing data on a scale of 1 : 50 000 and smaller. In looking for small objects the data should be processed on a larger scale and high-resolution images of 2.5—1.0 m/pixel are needed. The processing time for a satellite image in the A3 format is 2—3 days.

Frequency-resonance processing and decoding satellite images are based on a special algorithm for pattern recognition. A laser beam is divided into two absolutely iden-

**Table 2. Resonance frequencies for water of different mineralization [Levashov et al., 2017b]**

Water types	Mineralization, g · dm <sup>-3</sup>	Resonance frequencies, kHz
Structured from Alpine sources	< 1	717.6
Weakly mineralized from Morshynski sources	0.1—0.4	643.8
Average mineralization	0.5—1.0	615.7
Strong mineralization	5.0—15.0	551.5



tical beams by an optical divider. The first beam is modulated by the signal of hydrocarbons experimentally registered over oil and gas fields while the second one is focused on the satellite image of the study area. A special processor compares these images to discriminate a signal of sufficiently increased intensity due to a resonance effect that indicates the presence of hydrocarbons.

The ability of technology to searching for hydrocarbons was proved by a combined study of ground and satellite methods on the hydrocarbon fields in Ukraine (Shebelinske, Subbotinske, Kobzovske), Kazakhstan (Tengiz, Kazhigali, Teren-Uzuyk, Koshkimbet, Karaton) and Turkmenistan (Doutetabad—Donmez, Yuzhnyi lolotan). The estimation of relative pressure of fluids in reservoirs is principal advantage over available remote sensing techniques due to sufficient increase in the ability to select places for commercially successful drilling.

**Results.** The FRT revealed 3 vast anomalous zones of the "oil and gas" type in

the B9 in the Egyptian EEZ and B11 in the Cypriot EEZ [Levashov et al., 2015]. The anomaly-1 (A-1), A-2, A-3 occupies 105, 104, 42 km<sup>2</sup> respectively (Fig. 2). The total area of all the anomalous zones is 251 km<sup>2</sup>. Tectonic faults are delineated in area of the Zohr field.

The contour of the A-1 (Fig. 3) corresponds exactly to that of the larger reef (Fig. 4) of the Zohr build-up mapped by the 3D seismic survey [Goliat ..., 2015]. Within the A-1 three pressure intervals are determined. The first oil and gas-saturated horizon is characterized by a change in reservoir pressure from 37.2 to 41.8 MPa. Taking into account the hydrostatic principle, this pressure corresponds to a depth of 3720—4180 m. The estimated thickness of the productive horizon is 460 m. In the second hydrocarbon horizon reservoir pressure varies from 50.7 to 56.2 MPa at a depth of 5070—5620 m. In the third horizon, the pressure ranges in the interval of 65.0—65.7 MPa, between 6500 and 6570 m. The depths of the gas-bearing

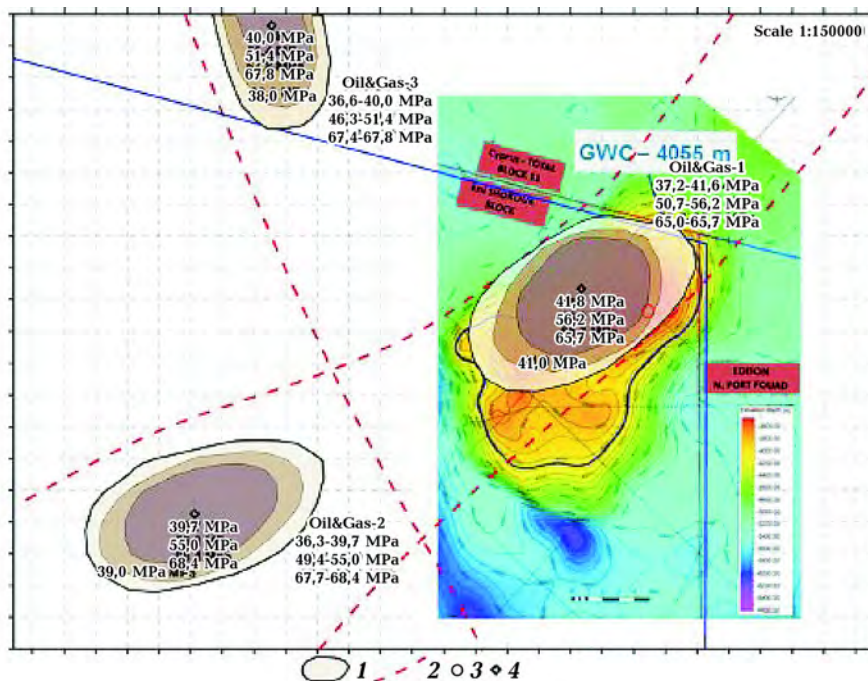


Fig. 3. Location of the anomalous zones of "oil and gas" type in the area of the Zohr field: 1 — contour of the anomalous zones; 2 — tectonic faults; 3 — position of the Zohr-1 well; 4 — vertical zones of fluids migration from the FRT data. GWC — gas-water contact.

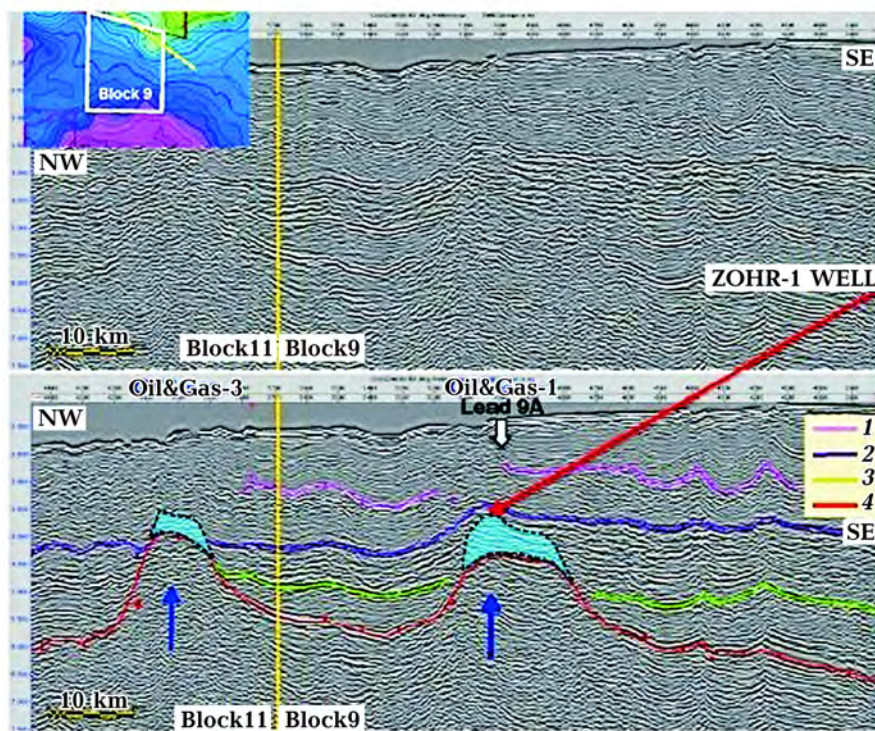


Fig. 4. Comparison of the results from the FRT and 3D seismic surveys in the B9 and B11 [Goliat ..., 2015]. Blue arrows indicate vertical zones of fluids migration from the FRT data.

horizons are in good agreement with the drilling data [Goliat ..., 2015]. The second example of the impressive coincidence from independent methods is presented in Fig. 4 where the A-1 and A-3 fully coincide with the anticline structures on the seismic cross-sections. However, the results of the FRT are more informative than of this survey because they revealed the zones of vertical fluids migration and anomalous reservoir pressure. The increase in the reservoir pressure toward the vertical migration zone is the common phenomenon of 14 hydrocarbon fields studied by the FRT all over the world [Levashov et al., 2015]. The role of these observations in the hydrocarbon accumulation will be discussed further.

Three anomalous zones of the "oil and gas" type of different areas were found in the southwestern B9 (Fig. 5). Only the A-1 is an object of interest due to its parameters. The area of the A-1 along the contour of zero pressure is 25.5 km<sup>2</sup> decreasing to

13.3 km<sup>2</sup> along the isoline of 60 MPa. A thickness of the gas-bearing horizons is estimated to be 50, 100, 540 and 260 m. The maximum value of fluids pressure is 141 MPa. A narrow vertical channel of deep fluids migration is traced in the center of anomaly.

After extensive 2/3D seismic campaign well Kg-70-1 was drilled by Shell in 2007, which did not provide compelling evidence to continue exploration. If we take into account the results of the FRT only such an outcome is possible as the well is located outside the anomalous zone.

Fig. 6 presents results of the FRT in the B11 nearby the Egyptian EEZ. The configuration of the "oil and gas" A-1 is the same as that of seismically derived. It is located at a distance of only 5 km from the base of the Zohr field. Along the isoline of zero pressure the area is 46 km<sup>2</sup> and along the pressure contour of 60 MPa it is 10.5 km<sup>2</sup>. Three intervals of reservoir pressure are estimated at a depth of 120 m, 510 m and 40 m.

The maximum value of fluids pressure is 141 MPa. There is a small local vertical conduit of deep fluids migration near the center of the A-1.

After failure drilling by the Onisiforos West-1 well in the Block 11, the detailed FRT was applied on 18—22 August, 2017 [Levashov et al., 2017c]. It turned out that the

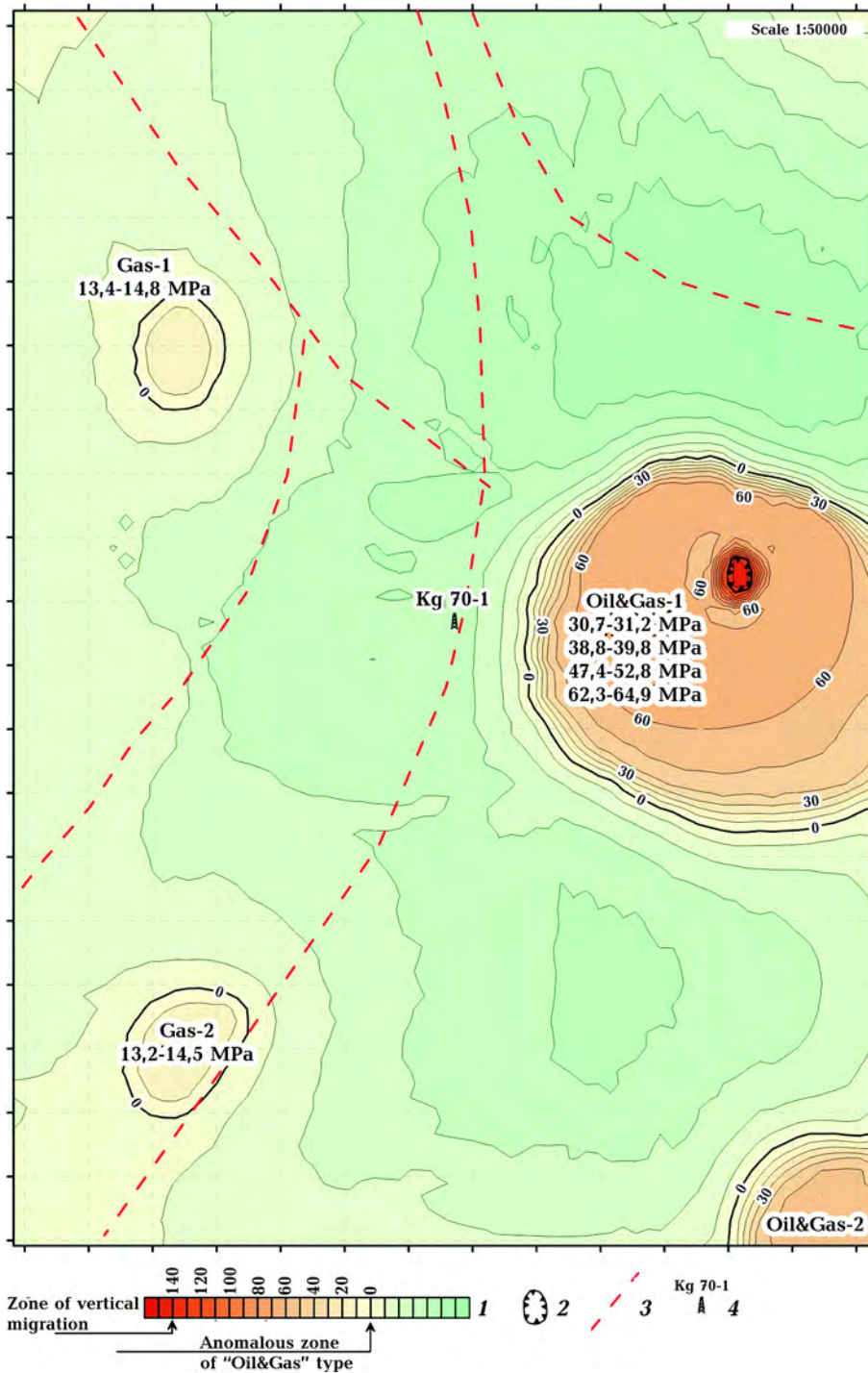


Fig. 5. Location of the anomalous zones of "oil and gas" type in the area of the Kg-1 well [Levashov et al., 2015]; 1 — scale of the values of reservoir pressure, MPa; 2 — location of the vertical channel of fluids; 3 — tectonic faults; 4 — position of the Kg-1 well.

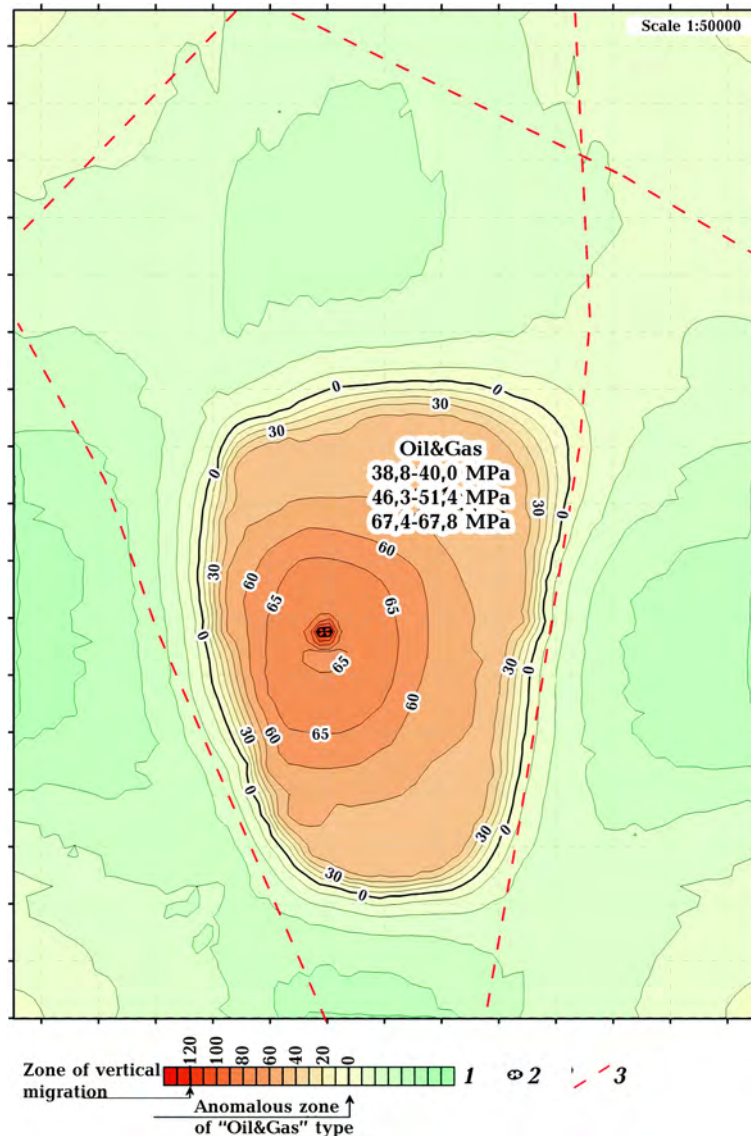


Fig. 6. Location of the anomalous zone of "oil and gas" type in the B11 of the Cypriot EEZ nearby the Zohr gas field [Levashov et al., 2015]: 1 — scale of the values of reservoir pressure, MPa; 2 — location of the vertical channel of fluids; 3 — tectonic faults.

well was located at the southeastern end of the distinct "gas" type A-1 (Fig. 7). The anomalous zone along the zero MPa isoline has 42 km<sup>2</sup>, along the 50 MPa isoline is 29 km<sup>2</sup>. The maximum value of reservoir pressure is 53.5 MPa. To the north of the well within the A-1 the channel was revealed for vertical migration of deep fluids.

**Discussion and conclusions.** Based on full support for the results of the FRT by those of 3D seismic profiling and Zohr-1 well,

an attempt is made to analyze a hydrocarbon play (conceptual model) for planning exploration activity in the B9 and B11. The hydrocarbon origin, area of anomalous zones, amount of reservoir pressure and occurrence of fluids channels and tectonic faults are used as inseparable indicators for a commercial discovery.

There are exploited four distinct petroleum plays of ages from the Triassic to Pliocene in the Eastern Mediterranean Region [Es-

sestime et al., 2016]. They are inferred from the notions of source rocks, reservoirs, seals and generation-migration of hydrocarbons. The Zohr play is widely considered as the most profitable because it is able to be characteristic of the whole Egyptian and Cypriot EEZs. Its major elements are biogenic gas, source rocks of the Oligocene and Miocene age and top seal of the from thick Messinian Evaporites. However, this approach should be treated with caution due to the complete failure results from the Onisiforos West-1 well [Paraskova, 2017]. In the frame of the Zohr play this fiasco is absolutely unexplainable. The constituents of the Zohr play are common for the carbonate platform at least in the B9 and B11 while the Onisiforos West-1 well is spudded at a distance of only 5 km from the base of the Zohr field.

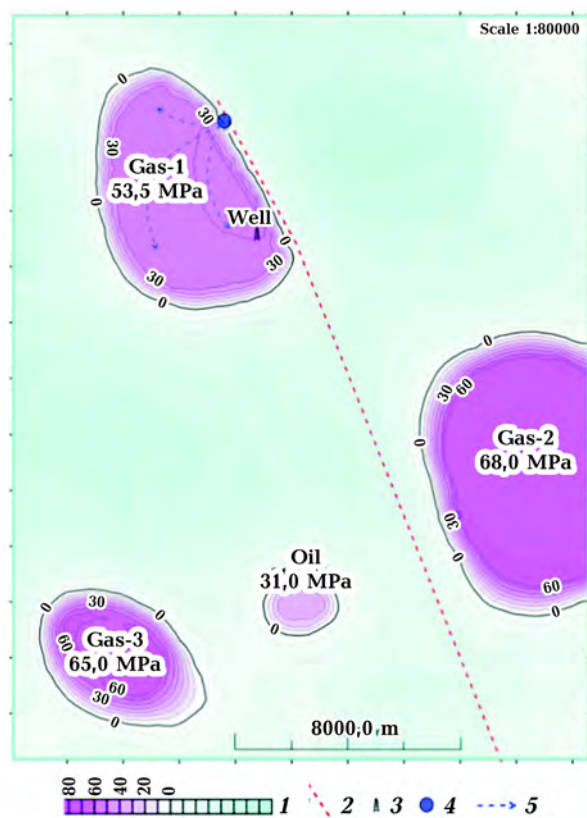


Fig. 7. Location of the anomalous zones of "gas" type in the area of the Onisiforos West-1 well: 1 — scale of the values of reservoir pressure, MPa; 2 — tectonic fault; 3 — location of the Onisiforos West-1 well; 4 — vertical channel of gas migration; 5 — gas migration paths of vertical migration of deep fluids.

The vaguest component of the most popular siliciclastic and carbonate plays of the Eastern Mediterranean is the origin of gas due to the absence of appropriate information on gas composition from big hydrocarbon fields in public domain. The Italian Company ENI determined the gas origin of the Zohr field by analogy with its previous identification case for the giant "Perla" biogenic gas field, Venezuela [Conofagos, Fokianou, 2017]. The Zohr field was created in a karstified limestone reservoir at the margin of paleo-lagoon in the Miocene similarly to the paleogeographic setting of the Perla field. The discovery of the Zohr field is considered as a significant breakthrough in the exploration strategy. Due to the ENI model the exploration efforts should be focused on seismically localizing karstified build-ups in the carbonate platform of the Eastern Mediterranean.

In all hydrocarbon plays the gas origin is inferred from type of source sediments revealed by seismic interpretations in the Eastern Mediterranean (see for example [Peck, Horscroft, 2005; Lie, Trayfoot, 2009; Di Cuia, 2017]). Such an approach defines, a priori, the gas origin as biogenic. The same conclusion is reached from thermogenic petroleum systems of deep horizons because they deal with thermally matured organic matter in sediments [Marlow, 2014]. The only mention on the deep gas composition came from the Leviathan Well-1 [Petzet, 2012]. A gas-bearing zone at about 590 m depth contains gas heavier than in the well's shallower intervals suggesting it's a thermogenic source.

This factual observation is in line with a regional geochemical study of 38 gas samples from the nine wells drilled the western Nile Fan. They approximate location (Fig. 8) is only given due to a proprietary request [Vandré et al., 2007]. The samples of the Early Miocene to Pliocene age range in depth from 1527—4480 m. To increase validity of geochemical data information from other sampling sites is also used from the eastern Nile Fan and Israeli offshore.

The values of  $\delta^{13}$  and  $C_1 / (C_2 + C_3)$  for methane vary from  $-66$  to  $-40$  ‰ and 15

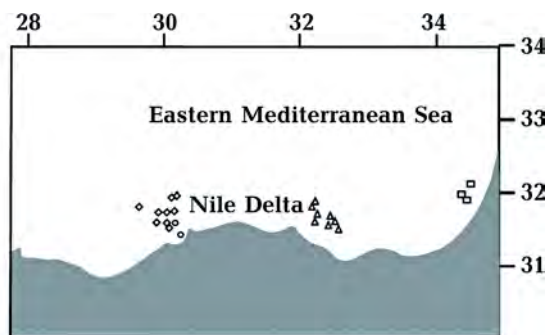


Fig. 8. Locations of sampling sites for the regional geochemical study [Vandré et al., 2007].

to 2000, respectively. They are presented in the form of the Bernard and Whittaker plots to identify the gas origin because it is widely used approach (Fig. 9, *a*, *b*). The values indicate microbial (2000—66 ‰) and thermogenic (13—35 ‰) origins for the most of the samples. However, the gas wetness index and  $\text{in-C}_4$  ratios don't change with depth undoubtedly indicating that methane either has resulted from microbial altering thermogenic hydrocarbons in situ or from migrating thermogenic gas upwards from a greater depth. The highest level of biodegradation is determined in the Pliocene reservoir shallower than 2400 m. In turn, the values of  $\delta^{13}$  between  $-66.0$  ‰ and  $-39.6$  ‰ and  $\delta\text{D}$  from  $-183$  ‰ to  $-148$  ‰ classify methane as a mixture of the thermogenic and microbial origin.

Only gas of the thermogenic origin is characteristic of the Miocene reservoirs. Microbial methane is determined in the Pliocene to recent sediments. The older sediments accumulated gas that moved upwards from greater depths. The intermediate gas composition results from coexistence of the end members of these gases.

Minor contribution of the biological methane into the dominant gas pathways was registered in practically the same areas in the offshore of the Nile delta [Younes, 2015]. This result is supported by a low content of organic carbon (0.15—1.15 %) in the bottom deposits and the Upper Miocene, Pliocene and Pleistocene sediments ( $<0.3$  %) in the Eastern Mediterranean [Kendric et al.,

1978; Pedrosa-Pámies et al., 2015]. Good source rocks are considered to have 2—5% of total organic content [Dolson, 2016].

A geochemical analysis of 20 samples was made from the Miocene and Plio-Pleistocene reservoirs of the Abu Qir, N. Abu Qir, Tamsah, Wakkar and port Fouad fields (Fig. 10) [Younes, 2015]. The natural gas contains 96.2—99.37 % of methane. The stable carbon and hydrogen isotopic composition of methane varies from  $-65.6$  to  $-40.3$  ‰ PDB and from  $-140$  to  $-170$  ‰ VPDB strongly indicating mixture of thermogenic and early microbial methane (Fig. 11). Only thermogenic methane is found in gas from the western province. Type III kerogen from terrestrial organic material is determined whose maturity parameter ( $R_0$ ) ranges from 0.6—0.5 %. As kerogen is cracked into thermal gas at  $1.05 R_0$  [Norman, 2014] the thermal gas from the Miocene sediments in the study area has abiogenic origin. Furthermore, in the Levant Basin and surrounding continental margins the Mesozoic sediments were mainly deposited in deep water [Esestme et al., 2016]. The pelagic sedimentation resulted in deep water detrital limestones, chalks, marls and shale. Siliciclastic were locally deposited due to a change in drainage of nearby land. Only the Triassic sediments are composed of shallow water carbonates, local evaporites and minor siliciclastics. Therefore, terrestrial material is not a source of Type III kerogen to be cracked into thermogenic gas. From this follows that thermogenic gas is of abiogenic origin in the Mesozoic sediments of the Eastern Mediterranean.

A model of generating two types of methane is presented in Fig. 12 [Al-Balushi et al., 2016]. The PT conditions are believed to be favourable for the large accumulation of biogenic gas just below the Messinian evaporites and for thermogenic gas in the Cretaceous deposits from which it leaks vertically to the Cenozoic reservoirs. The comparison between Figs. 9, *b* and 11 demonstrates their full identity.

As basin and petroleum systems modelling is a standard procedure in the exploration activity [see, for example, the comp-

prehensive book of [Hantshel, Kauerauf, 2009], it has been most successfully applied to elucidate the formation and transformation of hydrocarbon in the Eastern Mediterranean by [Halstenberg, 2014] and [Al-Balushi et al., 2016]. The paleo-temperatures calibrated for the Tamar and SPO-1 wells allow us to evaluate their role in these processes us-

ing new experimental information on biochemical processes.

The stable carbon and hydrogen isotopic composition of methane was analyzed from the Isis and North Alex mud volcano on the western Nile deep-sea fan, about 55 km from Alexandria [Mastalerz et al., 2007]. As the values of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta\text{D}$  are 55.1 ‰

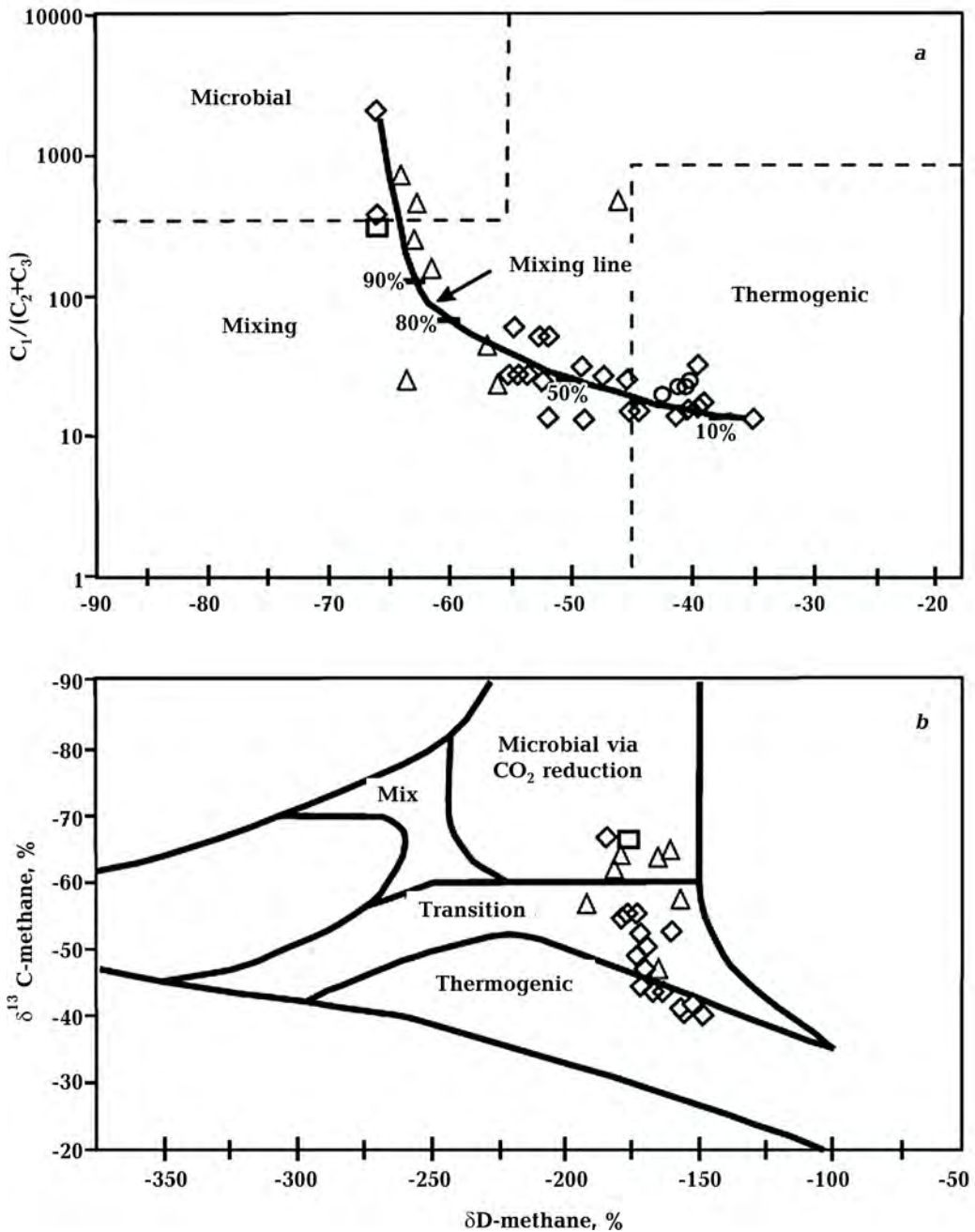


Fig. 9. Diagrams of carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) vs.  $C_1/(C_2+C_3)$  (a) and carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) vs. hydrogen ( $\delta\text{D}$ ) (b) for methane from the wells of the Egyptian and Israeli coast [Vandré et al., 2007].

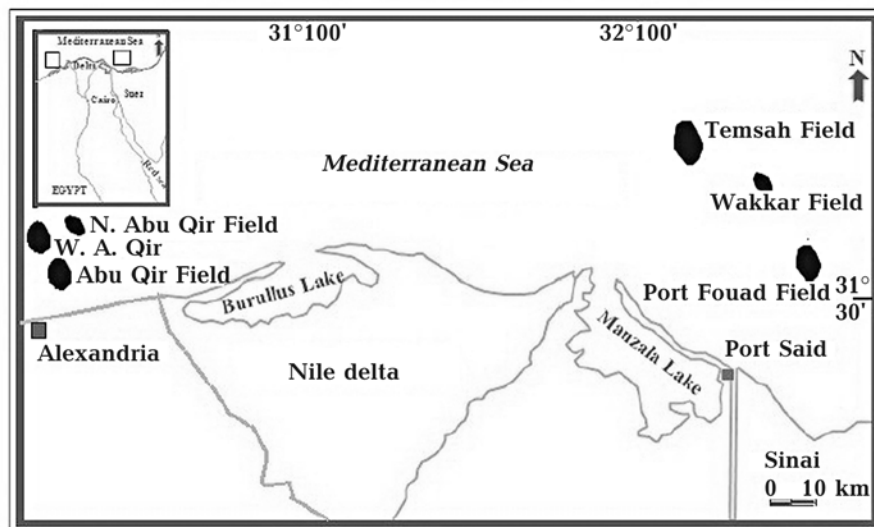


Fig. 10. Locations of sampling gas field for regional geochemical analysis [Younes, 2015].

VPDB and 203 ‰ VSMOW, respectively the methane origin is mainly thermogenic. Ascending fluids from deeper horizons are also revealed.

A new “clumped isotopic” technique revealed that the temperature for the formation of biological gas is less than 50 °C and that for thermogenic gas ranges from 155 to 221 °C [Stolper et al., 2014]. These results strongly support the above inference of the

original thermogenic gas in the Miocene sediments of Egyptian, Israeli and Cypriot EEZs as to the temperature at their top was 60–70 °C [Halstenberg, 2014; AlBalushi et al., 2016]. On the other hand, an archaeal consortium which is considered to be the major anaerobic methanogen of the sea environment cannot produce biomethane in the Mesozoic sediments for further cracking into thermogenic gas. The reason is that the

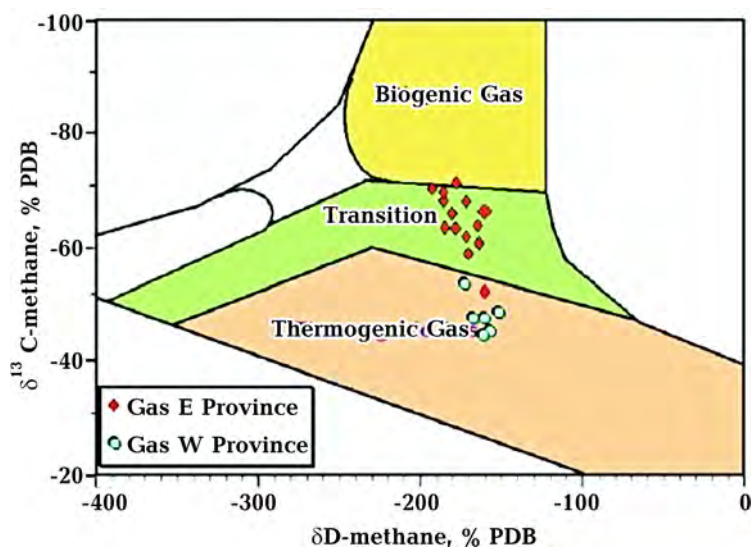


Fig. 11. Diagram of carbon ( $\delta^{13}$ ) vs. hydrogen ( $\delta D$ ) for methane from the Nile Delta [Younes, 2015].



temperature at their top (120 °C) is higher than the upper limit for Archaea life which is 121 °C [Kashefi, Lovley, 2003]. In other words, the thermogenic gas of abiogenic origin is predominant in the Miocene and deeper sediments off the Egyptian and Israeli coast.

Foregoing information leads to a logical conclusion that hydrocarbon plays based on only multichannel seismic-reflection profile data and on the biological hydrocarbon concept are not successful in planning the most economical exploring for prospective oil and gas discoveries. For example, Shell acquired 1862 km of 2D seismic lines, 7183 km<sup>2</sup> of 3D seismic data and drilled 9 failure exploration wells in B9 before new concessioner Eni discovered the Zohr field, having performed additional seismic surveys during 3 years. From this follows that drilling success rate is only 10%. Selecting wells places resulted in a very poor achievement similar to that of the old-time "wild cat" approach which was exploited in unstudied areas without any preliminary works. In this context, it is interesting inside story of ar-

riving at the ENI mega achievement: "Like all great exploration discoveries also the Zohr discovery is full of surprises, the unexpected, intuitions, mistakes, skill, enthusiasm, and ups and downs in which the human element is as crucial as the technology ..., fortune favours the brave, right? Right. If Eni had not decided to bring forward the exploration of Zohr, we would not be here talking about it" [Alfieri, 2015]. As such, their decisions appear largely to have been based on emotions rather than on an objective analysis of the available options from relevant multimethod data to obtain the best result.

To explain such a situation a comparative analysis was made between the FRT results from the Zohr and Onisiforos gas fields. With regard to seismic data, they demonstrate similar geological setting of these fields that was the basis for an optimistic forecast to discover new reserves 5 times greater than the Zohr [Conophagos et al., 2016]. The difference between the FRT results from the Zohr and Onisiforos gas fields is conceptual due to the absence of the gradient

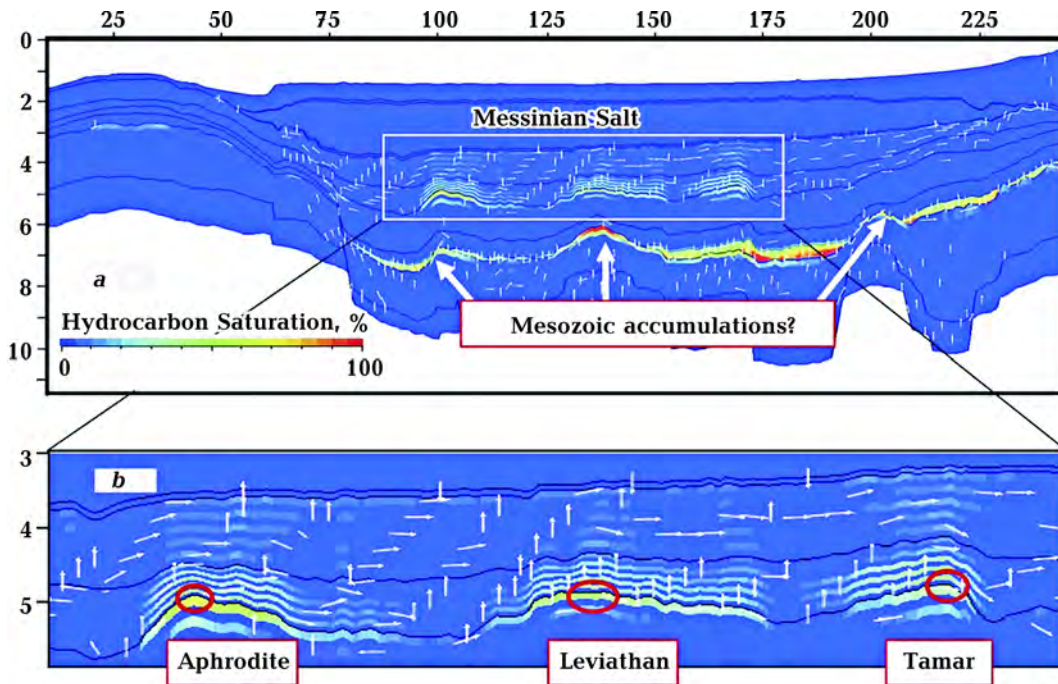


Fig. 12. Model for the origin of biogenic and thermogenic hydrocarbons in the Aphrodite, Leviathan and Tamar gas-oil fields [Al-Balushi et al., 2016].

of reservoir pressure in the Onisiforos discovery (See Fig. 6) that is proved to be an integral feature of commercial hydrocarbon fields [Levashov et al., 2017a].

There exists co-occurrence of exclusive commercial and non-commercial wells within the same big hydrocarbon field [Bembel et al., 2003]. This phenomenon can be exemplified by the Em-Egovskoe field in the West Siberian oil basin (Russia). Here nine wells were drilled in the area of 1 km<sup>2</sup>. However, during 10 years 92 % of oil was extracted from only the well R-2 while the rest oil recovery was provided by eight wells. The reason for extremely large productivity of the well R-2 is that it was accidentally drilled near the vertical channel of abiogenic fluids, which is characterized by high pressure ("geosoliton tube"). This is particularly the case for the situation of the Zohr and Onisiforos wells when the latter was penetrated the reservoir in a site of the background pressure.

Therefore, the fluid mechanism is the most suitable for origin fields in the B9 and B11 because the methane is mainly thermo-

genic in the major gas field of the Eastern Mediterranean (see the previous text) and the Zohr Well-1 is located near the vertical channel of high pressure (See Fig. 3). Another line of evidence in favour of this mechanism comes from the interpretation of the magnetic survey in the area of the hydrocarbon fields in the Eastern Mediterranean [Petrova, Petrishchev, 2011].

To the west of the Nile Delta and near the southern coast of the Cyprus gas fields are confined to the inclined zone of decreased magnetization at a 20—4 km depth (Fig. 13, a). The similar zone occurs beneath the Nile Delta and the Tamar gas field (Fig. 13, b). The Dalit gas field is confined to the low magnetization lens (2—4 km depth) above the zone of the same condition at a depth of 10—12 km (Fig. 13, c). The magnetization decrease results from hydrocarbon reworking due to influence of upwelling flows of heated material from the mantle along weaken tube-like zones in the lithosphere. There is a network of intraplate (mantle) tectonic faults delineated by multi-geophysical approach in the area of gas fields of the Ni-

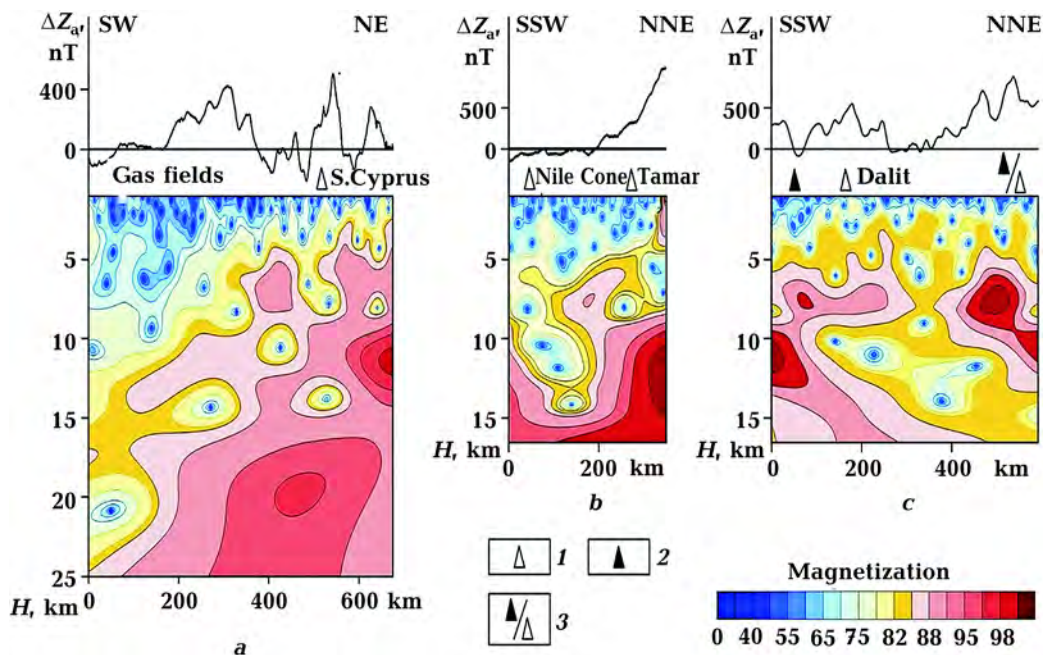


Fig. 13. Geomagnetic cross-sections of the gas fields in the Eastern Mediterranean [Petrova, Petrishchev, 2011]. Fields: 1 — gas; 2 — oil; 3 — supposed zones of oil and gas accumulation.

le Delta and Levantine Basin [Eppelbaum, Katz, 2011]. They are able to provide favourable conditions for forming such pathways. Thus, selecting an optimal drilling location should be based on integrated studies.

Based on the concept of migration of abiogenic hydrocarbon together with deep fluids along vertical conduit and the increase in the reservoir pressure toward this pathway (the peculiarities of the Zohr gas field), producible volume of hydrocarbons is prognosed within the areas of the B9 and B11 "oil and gas" type anomalies (See Figs. 5, 6). Available information evidences for non-commercial gas accumulation in the Oniciforos discovery.

In conclusion, the major results are as follows.

1. The anomalies of "oil and gas" type were revealed by the frequency-resonance technology of processing and decoding the satellite images of the licence B9 and B11.
2. Most of them evidence for the vertical pathways for migration of deep fluids and the horizontal gradient of the reservoir pressure.
3. As these features are characteristic of the anomaly from the Zohr gas field they are first used as the indicators of a commercial discovery.
4. Based on these indicators the optimal locations are recommended for exploration drilling in the B9 and B11. The Oniciforos discovery can't be considered as commercial.
5. In the Miocene sediments, abiogenic gas is mostly determined by available information on the stable carbon and hydrogen isotopic composition of methane from the wells and paleotemperature regime off the Egyptian and Israeli coast.
6. The siliciclastic and carbonate plays are equally useful for planning exploration activity in the B9 and B11. To decrease the in potential risk of drilling requires an interdisciplinary approach.

## Implication of satellite images in studying potential hydrocarbon resources in the licence Blocks 9 and 11, the exclusive economic zones of Egypt and Cyprus

© *O. M. Rusakov, I. N. Korchagin, N. A. Yakymchuk, S. P. Levashov, V. D. Soloviev, D. N. Bozhezha, 2018*

A frequency-resonance technology was used for processing and decoding the satellite images of the licence Blocks 9 and 11 in the Eastern Mediterranean. The anomalies of "oil and gas" type were revealed in the study area. The supergiant Zohr gas field produces the prominent anomaly covering the largest area of 251 km<sup>2</sup>. This anomaly evidences for the channels for vertical migration of deep hydrocarbon-bearing fluids and the horizontal gradient in reservoir pressure. For the first time, these two specific findings were suggested to be indicators of a commercial discovery. Based on them, several "oil and gas" type anomalies were recommended for exploration drilling in the Blocks 9 and 11. Available information cannot allow us to consider the Oniciforos discovery as a commercial gas field. The siliciclastic and carbonate plays are equally workable in the Egyptian, Cypriot and Israeli EEZs where in the Miocene sediments abiogenic methane is the main component of gas which ascends to reservoirs from deeper layers. Selecting an optimal drilling location requires an interdisciplinary approach.

**Key words:** Nile Fan, Levant Basin, satellite images decoding, discoveries classification, hydrocarbons origin.

References

- Atoll Gas Field, North Damietta Offshore Concession, East Nile Delta. [www.offshore-technology.com/.../atoll-gas-field-north-damietta-offshore-concession-...](http://www.offshore-technology.com/.../atoll-gas-field-north-damietta-offshore-concession-...) 30 June 2016.
- Al-Balushi A., Neumaier M., Fraser A., Jackson C., 2016. The impact of the Messinian Salinity Crisis on the petroleum system of the Eastern Mediterranean: a critical assessment using 2D-petroleum system modelling. *Petroleum Geoscience* 22, 357—379. <https://doi.org/10.1144/petgeo2016-054>.
- Alfieri M., 2015. The discovery and development of the Zohr gas field in Egypt | Eniday. [https://www.eniday.com/en/human\\_en/discovery-development-gas-zohr](https://www.eniday.com/en/human_en/discovery-development-gas-zohr).
- Bembel R. M., Megeria V. M., Bembel S. R., 2003. Geosolitons: the functional system of the Earth, conception, exploration and exploitation of hydrocarbon fields. Tyumen, Vector Buk, 224 p. (in Russian).
- BP Statistical Review of World Energy, June 2017. <https://www.bp.com/.../bp/.../energy.../statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-wo>.
- Conophagos E., Lygeros N., Foskolos A., 2016. Target reserve 5 times greater than ZOHR within the Cypriot EEZ. <https://www.cyprusgasnews.com/target-reserve-5times-quater-Zohr/>.
- Conofagos E., Fokianou T., 2017. "Zohr" Supergiant Biogenic Gas Field Discovery & Its Importance for Greece. [www.academia.edu/.../\\_Zohr\\_Supergiant\\_Biogenic\\_Cas\\_Discovery](http://www.academia.edu/.../_Zohr_Supergiant_Biogenic_Cas_Discovery).
- Di Cuia R., 2017. East Mediterranean: the new frontier opens. [http://www.researchgate.net/.../316109903\\_EAST\\_MEDITERRANAEN\\_THE\\_NEW\\_F](http://www.researchgate.net/.../316109903_EAST_MEDITERRANAEN_THE_NEW_F).
- Dolson J., 2016. Understanding Oil and Gas Shows and Seals in the Search for Hydrocarbons. Cham, Switzerland: Springer Int. Publ., 486 p.
- Ellinas C., Roberts J., Tzimitras H., 2016. Hydrocarbon developments in the Eastern Mediterranean. Washington DC Atlantic Council. <http://www.atlanticcouncil.org/publications/reports/hydrocarbon-developments-in-the-eastern-mediterranean>.
- Eppelbaum L., Katz Y., 2011. Tectonic-Geophysical Mapping of Israel and the Eastern Mediterranean: Implications for Hydrocarbon Prospecting. *Positioning* 2(1), 36—54. doi: 10.4236/pos.2011.21004.
- Erestime P., Hewitt A., Hodgson N., 2016. Zohr — a newborn carbonate play in the Levantine Basin, East-Mediterranean. *First Break* 34, 87—93.
- Gardosh M., 2016. The Levant Basin — A World-Class Hydrocarbon Province in the SE Mediterranean Sea. [http://www.energy-sea.gov.il/English-Site/Publishing/Images/Pages/Forms/EditForm/RoadshowPresentationDr.MichaelGardosh\\_LevantBasinHCPotential.pdf](http://www.energy-sea.gov.il/English-Site/Publishing/Images/Pages/Forms/EditForm/RoadshowPresentationDr.MichaelGardosh_LevantBasinHCPotential.pdf).
- Goliat Field Trip, 2015. [https://www.eni.com/docs/it\\_IT/enipedia/informazioni.../2015/goliat-final-website](https://www.eni.com/docs/it_IT/enipedia/informazioni.../2015/goliat-final-website).
- Hanstelberg D. B., 2014. Reconstruction of Tectonic Paleo-Heat Flow for the Levantine Basin (Eastern Mediterranean). Implications for Basin and Petroleum System Modelling. Master of Science Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany. 84 p.
- Hantshel T., Kauerauf A., 2009. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 476 p.
- Hedvig P., 1975. Experimental Quantum Chemistry. New York—London: Academic Press, 534 p.
- Kashefi K., Lovley D. R., 2003. Extending the upper temperature for life. *Science* 301(5635), 934. doi: 10.1126/science.1086823.
- Kendrick J. W., Hood A., Castano J. R., 1978. Petroleum-generating potential of sediments from the Eastern Mediterranean and Black Sea. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Vol. XLII Part 2, Washington (U.S. Government Printing Office), 729—735.
- Kirschbaum M.A., Schenk C.J., Charpentier R.R., Klett T.R., Brownfield M.E., Pitman J.K., Cook T.A., Tennyson M.E., 2010. Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Nile Delta Province, Eastern Mediterranean. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS 2010—3027. 4 p. <http://energy.cr.usgs.gov/oilgas/>.
- Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., 2011. Assessment of relative value of the reservoir pressure of fluids: results of the experiments and prospects of practical applications. *Geoinformatika* 2, 19—35 (in Russian).
- Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., 2012. Frequency-resonance principle, mobile geoelectric technology: a new paradigm of Geophysical Investigation. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(4), 167—176 (in Russian).

- Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Bozhezha D.N., 2015. Operative assessment of hydrocarbon potential of Zohr prospect in the Mediterranean Sea (Shorouk block, Egypt offshore) by the frequency-resonance method of the remote sensing data processing and interpretation. doi: 10.13140/RG.2.1.2917.9360.
- Levashov S. P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N. et al., 2017a. Application of mobile and direct-prospecting technology of remote sensing data frequency-resonance processing for the vertical channels of deep fluids migration detection. *NCGT Journal* 5(1), 48—91.
- Levashov S., Yakymchuk N., Korchagin I., 2017b. On the Possibility of Using Mobile and Direct-Prospecting Geophysical Technologies to Assess the Prospects of Oil-Gas Content in Deep Horizons. In: *Oil and Gas Exploration: Methods and Application*. Eds S. Gaci, O. Hachay. American Geophysical Union. P. 209—236.
- Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N., Bozhezha D.N., 2017c. Preliminary results of the oil and gas potential estimation in area of "Onisiforos West-1" Well drilling in Mediterranean Sea (block 11 on the Cyprus offshore). *Geology of seas and oceans. Proc. of XXII Int. Conf. on Marine Geology, Moscow, November 20—24, 2017*. Vol. II, P. 201—205.
- Lie Ě., Trayfoot M., 2009. Seismic Characterization of the First 3D Surveys Offshore Cyprus and Lebanon. Search and Discovery Article # 10194. <http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2009/10194lie/images/lie.pdf.html>.
- Mastalerz V., de Lange G.-J., Dählmann A., Feseker T., 2007. Active venting at the Isis mud volcano, offshore Egypt: Origin and migration of hydrocarbons. *Chemical Geology* 246 (1-2), 87—106. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.09.005>.
- Marlow L., 2014. Tectonostratigraphic History and Petroleum Potential of the Levantine Basin, Eastern Mediterranean. AAPG Memoir 106: Petroleum Systems of the Tethyan Region. P. 279—299.
- Norman J.H., 2014. Dictionary of petroleum exploration, drilling & production. Tulsa: Pen Well corporation, 769 p.
- Paraskova T., 2017. Onisiforos gas field not commercially viable. <http://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/New-Gas-Discovery-Offshore-Cyprus-Not-Commercially-Viable.html>.
- Peck J.M., Horscroft P., 2005. "Bottom-up" analysis identifies eastern Mediterranean Prospects. [www.offshore-mag.com/.../lsquotbottom-uprsquo-analysis-identifies-eastern-mediterra](http://www.offshore-mag.com/.../lsquotbottom-uprsquo-analysis-identifies-eastern-mediterra).
- Pedrosa-Pàmies, R., Parinos C., Sanchez-Vidal A., Gogou A., Calafat A., Canals M., Bouloubassi I., Lampadariou N., 2015. Composition and sources of sedimentary organic matter in the deep eastern Mediterranean Sea. *Biogeosciences* 12, 7379—7402. <https://doi.org/10.5194/bg-12-7379-2015>.
- Petrova A.A., Petrishchev M.S., 2011. Fluid systems of the Mediterranean. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* 17(1), 23—33 (in Russian).
- Petzet A., 2012. Noble halts Leviathan deepening in gas formation. *Oil & Gas Journal*. <http://www.ogi.com/articles/2012/05/noble-halts-leviathan-deepening-in-gas-formation.html>.
- Schenk C.J., Kirschbaum M.A., Charpentier R.R., Klett T.R., Brownfield M.E., Pitman J.K., Cook T.A., Tennyson M.E., 2010. Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources of the Levant Basin Province, Eastern Mediterranean, U. S. Geological Survey Fact Sheet, 2010—3014, 4 p.
- Shuman V.N., 2007. Electromagnetic signals of the lithospheric origin in the modern ground and remote sensing. *Geofizicheskiy zhurnal* 29(1), 42—48 (In Russian).
- Stolper D.A., Lawson M., Davis C.L. et al., 2014. Formation temperatures of thermogenic and biogenic methane. *Science* 6191:1500—1503. Technical Report. 2012. Block 9, Shorouk offshore. [www.egas.com.eg/BidRound2012/block009.pdf](http://www.egas.com.eg/BidRound2012/block009.pdf).
- Technical Report. Block-9 Shorouk offshore — EGAS. [www.egas.com.eg/BidRound2012/block009.pdf](http://www.egas.com.eg/BidRound2012/block009.pdf) 2012.
- Vandré C., Cramer B., Gerling P., Winsemann J., 2007. Natural gas formation in the western Nile Delta (Eastern Mediterranean): thermogenic versus microbial mechanisms. *Org Geochem* 38(4), 523—539. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.12.006>.
- Younes M.A.-A., 2015. Natural Gas Geochemistry in the Offshore Nile Delta, Egypt. In: *Advances in Petrochemicals*, P. 27—40. <http://dx.doi.org/10.5772/60575>.

# Современные и палеонапряжения в пределах северной окраины Черного моря и Горного Крыма в мезо-кайнозое—квартере (по механизмам очагов землетрясений и полевым тектонофизическим данным)

© А. Муровская<sup>1</sup>, Ж.-К. Ипполит<sup>2</sup>, Е. Шеремет<sup>1,3</sup>, Т. Егорова<sup>1</sup>, 2018

<sup>1</sup>Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>Университет Аикс-Марсель, GEREGE UMR 34 CNRS-IRD, BP 80, Аикс-ен-Прованс, Франция

<sup>3</sup>Университет Ниццы—Софии Антиполис, CNRS, OCA-UMR Геоазур, Вальбонн, Франция

Поступила 28 декабря 2017 г.

Сучасні поля напружень на північній частині Чорного моря схарактеризовано на підставі 32 механізмів вогнищ землетрусів. Орієнтування осей стиснення у вогнищах засвідчують, що сучасний тектонічний процес відбувається переважно в умовах стиснення і транспресії. Для 13 механізмів, розташованих у поясі між Південним берегом Криму та підшовою континентального склону, розраховано регіональне поле напружень, яке відображає деформаційний режим горизонтального стиснення у північно-західному—південно-східному напрямку. Наведено результати визначення полів палеонапружень і деформаційних режимів за даними польових тектонофізичних спостережень у 105 пунктах. Інтерпретацію виконано у межах двох загальних етапів: розтягу в ранній крейді та стиснення в кайнозої—квартері. До стадії кайнозойського стиснення віднесено поля напружень підкидного, покривного та зсувного типів. Побудовано генералізовані траєкторії стиснення, які утворюють віялоподібний малюнок у дугоподібному секторі Південного берега Криму від м. Меганом до м. Аю-Даг і змінюють свій напрямок від північ—південь до захід—схід. Розраховано осереднені поля напружень, які для Судацько-Феодосійської зони є підкідними, а для центральної і західної частин Гірського Криму — зсувними. Південно-західна частина Гірського Криму характеризується полем напружень зсувного типу з південно-західним—північно-східним напрямком осі стиснення. На етапі крейдяного розтягу поля напружень були скидовими. Для південно-західної частини Гірського Криму встановлено тенденцію розтягнення північно-північно-східного—південно-південно-західного напрямку, а для його центральної частини — північно-східного—південно-західного.

**Ключові слова:** Крим, Чорне море, механізми вогнищ землетрусів, поле напружень, деформаційний режим, кінематичний аналіз, кайнозойське стиснення.

**Введение.** Горный Крым (ГК) является западным завершением Крымско-Кавказского орогенного пояса и инвертированной частью северного шельфа Черно-

го моря (ЧМ), в пределах которого обнажается полный стратиграфический разрез ЧМ [Nikishin et al., 2017], хранящий информацию о его истории. Авторы на-

стоящей статьи рассматривают эволюцию ГК в рамках двух генерализованных этапов: мелового растяжения и кайнозойского сжатия, проявившихся во всем Циркум-Черноморском регионе и связанных с развитием Черноморского бассейна и окружающих его горных поясов.

Правомерность такого подхода подтверждается как геолого-структурными наблюдениями в пределах сухопутных окраин ЧМ, например, [Görür, 1997; Hippolyte et al., 2010, 2016; Муровская и др., 2014], так и сейсмическими исследованиями в его акватории [Баранова и др., 2008; Dinu et al., 2005; Khriachtchevskaya et al., 2010; Munteanu et al., 2011; Espurt et al., 2014; Starostenko et al., 2017]. Этап мелового растяжения связан с формированием сбросов и грабенов на большей части окраин ЧМ, а этап кайнозойского сжатия проявился в инверсионных деформациях меловых грабенов [Dinu et al., 2005; Khriachtchevskaya et al., 2010; Munteanu et al., 2011; Espurt et al., 2014].

Черноморский бассейн состоит из двух суббассейнов — восточного (ВЧБ) и западного (ЗЧБ), разделенных Срединно-Черноморским поднятием [Туголесов и др., 1985; Finetti et al., 1988; Robinson et al., 1995; Афанасенков и др., 2007; Yegorova, Gobarenko, 2010; Nikishin et al., 2015a, b]. Горный Крым расположен между северо-западным продолжением ВЧБ и северной окраиной ЗЧБ. Крымско-Кавказский орогенный пояс, частью которого является ГК, ограничен глубоководными прогибами: Сорокина и Туапсе на юге; Индоло-Кубанским и Западно-Кубанским на севере [Паталаха и др., 2003; Nikishin et al., 2017]. Эти бассейны заполнены мощными (больше 5 км) глинистыми молассами майкопской серии, перекрытыми более молодыми отложениями [Finetti et al., 1988; Robinson et al., 1995; Nikishin et al., 2015a, b]. Накопление майкопских моласс по времени соответствует подъему и денудации Большого Кавказа (БК) и ГК, например [Афанасенков и др., 2007; Nikishin et al., 2015a, b].

С позиции плитовой тектоники ЧМ интерпретируется как задуговой бассейн,

открывшийся над зоной северонаправленной субдукции палеоокеана Неотетис под южную окраину Евразии, например [Zonenshain, Le Pichon 1986; Finetti et al., 1988; Robinson et al., 1995; Okay, Nikishin, 2015 и ссылки в них]. Вопросы времени, последовательности и направления открытия ЧМ бассейнов остаются дискуссионными. “Медленное” раскрытие ЧМ в раннем мелу—палеоцене предполагается в работах [Zonenshain, Le Pichon, 1986; Finetti et al., 1988; Robinson et al., 1995]. В работе [Khriachtchevskaya et al., 2010] на основе сейсмических профилей ОГТ и пересмотра стратиграфии по скважинам сделан вывод об аптско-сантонском периоде рифтогенеза на северной окраине ЧМ. В работах [Nikishin et al., 2015a, b] период континентального рифтогенеза относится к позднему баррему—альбу, а раскрытие Черноморских глубоководных впадин с субокеанической корой происходит в сеномане—среднем сантоне. Рифтинг ЗЧБ и ВЧБ представляется одновременным (см. например, [Nikishin et al., 2015a, b] или открытие ВЧБ предполагается позже, чем ЗЧМ, например в палеоцене [Finetti et al., 1988; Robinson et al., 1995].

Большинство предположений об эволюции ЧМБ основывается на интерпретации сейсмических профилей, где возрастная привязка глубоких сейсмических горизонтов не всегда базируется на данных бурения в силу больших мощностей (около 15 км) пострифтовых отложений, например [Yegorova, Gobarenko, 2010; Nikishin et al., 2015a, b]. В связи с этим изучение породных комплексов и их структурных соотношений в обнажениях ГК (инвертированная часть северного шельфа ЧМ) является исключительно важным и даже решающим для вопросов эволюции ЧМ.

Этап кайнозойского сжатия в широком региональном контексте связан с коллизией нескольких континентальных микроплит — Киршехирской, Тавро-Анатолийской, Южно-Армянской, Арабской — с южной окраиной Евразии [Finetti et al., 1988; Okay, Nikishin, 2015].

Роль и масштабы кайнозойской фазы сжатия в формировании складчато-надвиговых деформаций в пределах ГК является темой дискуссии, как и наличие или отсутствие крупных горизонтальных перемещений. В классических работах Муратова, которые и сейчас остаются актуальными, не предполагается существенных горизонтальных перемещений [Муратов, 1969]. Представления о покровном строении верхнеюрско-нижнеберриасских отложений яйлы ГК разделяет ряд исследователей, например, [Милеев и др., 1998; Юдин, 2011 и ссылки в них]. В работе [Юдин, 2011] предложена надвиговая модель, в соответствии с которой ГК состоит из большого количества надвиговых пластин, тектонических меланжей и олистостром. В работе [Sheremet et al., 2016] представлены два разреза через восточную часть ГК и прогиб Сорокина, основным элементом которых также являются южновергентные надвиги.

Дискуссионным остается и вопрос о времени формирования деформаций сжатия в пределах ГК. Они развиты преимущественно в пределах Главной гряды Крымских гор, где самые молодые отложения относятся к титону—берриасу. Следовательно, обнаруженные в них деформации не старше этого возраста, но могут быть сколь угодно молодыми. Интересной представляется точка зрения [Бызова, 1980] о двух этапах деформаций сжатия — киммерийском и альпийском, наложенных друг на друга в пределах Главной гряды ГК, в то время как Качинское поднятие, расположенное севернее, практически не затронуто кайнозойскими деформациями. Аналогичный вывод сделан и в работе [Saintot et al., 1999] на основе полевых тектонофизических работ в ГК.

В соответствие с новыми датировками таврического флиша как нижнемелового [Poradyuk et al., 2013; Sheremet et al., 2016a и ссылки в них], структуры сокращения к востоку от Караби-яйлы были отнесены авторами [Sheremet et al., 2016a] к кайнозойскому этапу деформации. Первая фаза сжатия в ГК, синхронная с глав-

ной фазой деформации в Восточных Понтидах, завершилась до среднего эоцена [Sheremet et al., 2016b]. Это не противоречит представлениям о кайнозойской инверсии в пределах Судакского глубоководного трога [Nikishin et al., 2017 и ссылки в ней]. В Судакском трогe главная фаза складчатости имела место на границе эоцена—олигоцена и в майкопское время — олигоцене—раннем миоцене, а главная фаза воздымания ГК произошла в послесарматский период. В работе [Юдин, 2011] Подгорный и Южнобережный меланжи в основании обрывов Главной гряды и вдоль береговой линии ЧМ аргументированно относятся к активным структурам неоген-четвертичного возраста.

Настоящая статья является продолжением тектонофизических исследований в пределах западной части Горного Крыма (ЗГК) [Муровская и др., 2014], где этап кайнозойского сжатия подтверждается сдвиговыми и надвиговыми деформациями в верхнемеловых—неогеновых породах. Этап растяжения в ЗГК начинается в валанжин-барремское время и достигает максимальной интенсивности в аптское. Он подтверждается конседиментационным сбросообразованием и формированием олистостромовых комплексов на протяжении практически всего раннего мела.

Данное исследование сфокусировано на эволюции ГК и северной окраины ЧМ в мезо-кайнозойе—квартере. Оно обобщает все наличные тектонофизические данные по ГК, собранные авторами за последние 20 лет, и все имеющиеся на данный момент механизмы очагов землетрясений Крымской сейсмогенной зоны (КСЗ), а также предлагает их интерпретацию в рамках двух генерализованных этапов: растяжения в раннем мелу и сжатия в кайнозойе—квартере.

Современные поля напряжений охарактеризованы на основании механизмов очагов землетрясений КСЗ, которые собраны и обобщены с позиции поддвига Восточно-Черноморской микроплиты под Скифскую плиту [Муровская и др., 2014;



Гобаренко и др., 2016]. В данном исследовании авторы обновили данные по механизмам очагов, в соответствии с работой [Пустовитенко, Эреджепов, 2017], и поставили задачу установить связь современного поля напряжений по механизмам очагов с полями палеонапряжений по тектоническим зеркалам, изученным в обнажениях.

Актуальность изучения полей напряжений обусловлена повышенной сейсмической опасностью данного региона и его высоким углеводородным потенциалом. Особенности пространственного распределения деформаций и напряжений, а также их возрастная привязка необходимы в вопросах, касающихся геодинамической эволюции ЧМ и ГК.

**Определение современного поля напряжений по механизмам очагов землетрясений.** Северная окраина ЧМ характеризуется значительным уровнем сейсмической активности. Подавляющее большинство землетрясений КСЗ локализуется в полосе между Крымско-Кавказским побережьем и подошвой континентального склона, обозначая активную зону, где осуществляется современный тектонический процесс [Гобаренко и др., 2016]. Вдоль континентального склона ЧМ проходит надвиговой фронт, маркирующий коллизионное взаимодействие Скифской плиты и Черноморской микроплиты [Finetti et al., 1988; Гобаренко и др., 2016]. Механизмы очагов сильных землетрясений КСЗ дают возможность проанализировать особенности сеймотектонического процесса в понятиях напряжений и деформационных режимов.

**Методика.** Определение современного поля напряжений по механизмам очагов землетрясений находится в поле научных интересов многих исследований, например, [Ребецкий, 2007; Vavrychuk, 2014; Гинтов и др., 2014]. Изначально интерпретация механизмов очагов землетрясений основывалась на представлениях о том, что ориентировка осей главных напряжений совпадает с ориентировкой Р и Т (кинематических) осей фокальных механиз-

мов, например, [Балакина и др., 1972]. В работе [Костров, 1974] было показано, что с точки зрения механики сплошной среды такой подход заведомо предполагает совпадение сдвигового разрыва с плоскостью максимального касательного напряжения. Для реальных процессов, проходящих в земной коре, сейсмогенные разрывы могут не совпадать с плоскостью максимального касательного напряжения, так как разрушение горных пород определяется не только величиной сдвиговых напряжений на плоскости разрыва, но и величиной нормальных напряжений на ней, создающих силы трения на этой плоскости [Byerlee, 1978]. Основное предположение, лежащее в основе современных методов определения поля напряжений по механизмам очагов землетрясений, заложено в гипотезе Волеса и Бота [Bott, 1959], суть которой состоит в том, что вектор перемещения по сейсмогенному разрыву совпадает с направлением разрешающего касательного напряжения на нем. Существует и другой подход к реконструкции поля напряжений по совокупности механизмов очагов землетрясений, основанный на определении осредненного положения Р и Т осей для группы землетрясений, которые отождествляются с главными осями тензора напряжений. Оба подхода реализованы в алгоритмах расчета поля напряжений как по тектоническим зеркалам, так и по механизмам очагов землетрясений и имплементированы в программу Вин Тензор [Delvaux, Sperner, 2003], которая применена в данной работе.

**Данные и результаты.** В процессе многолетних сейсмологических исследований сотрудниками Отдела сейсмологии Института геофизики НАН Украины выполнено решение механизмов очагов сильных землетрясений ( $M \geq 4$ ), произошедших в пределах северной части ЧМ, включая КСЗ. Механизмы 31 землетрясения за период 1927—2013 гг. представлены в работе [Гобаренко и др., 2016], еще один механизм за 2016 г. — в работе [Пустовитенко, Эреджепов, 2017]. В настоящей статье 32 механизма обобщены и разделены

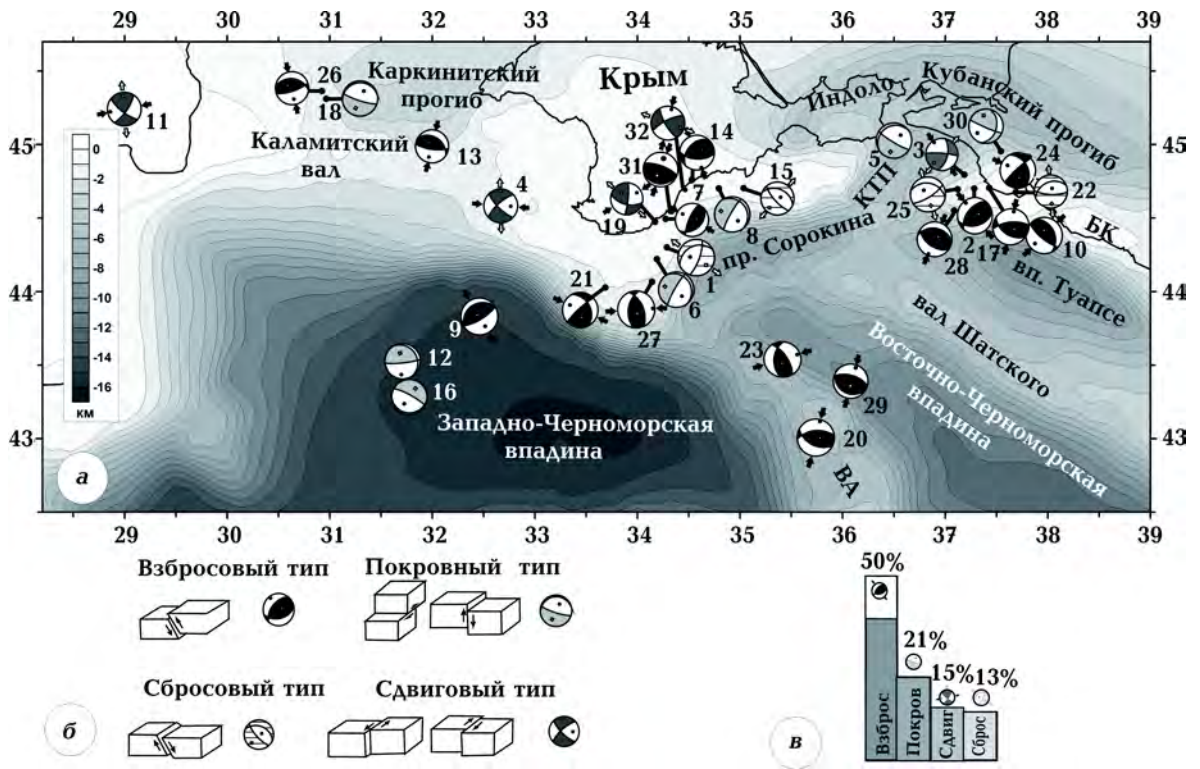


Рис. 1. Пространственное распределение и типизация механизмов очагов 32 землетрясений Крымской сейсмогенной зоны: а — эпицентры сильных землетрясений и соответствующие им механизмы на фоне глубин кристаллического фундамента, по [Туголесов и др., 1985]; б — кинематические типы разрывов и соответствующие им механизмы очагов землетрясений; в — процентное соотношение механизмов разных типов. БК — Большой Кавказ, ВА — вал Андрусова, КТП — Керченско-Таманский прогиб.

на четыре группы в зависимости от ориентировок  $P$  и  $T$  осей (рис. 1).

Статистический анализ иллюстрирует присутствие механизмов всех типов при преобладании взбросового и покровного деформационных режимов. Выделение покровного деформационного режима предложено в работе [Паталаха и др., 2003], в работе [Гинтов, 2005] он называется "режимом, связанным с перемещением по горизонтальной плоскости".

Для 13 механизмов, расположенных непосредственно вдоль южного побережья Крыма в пределах Южно-Крымского надвигового фронта, был выполнен статистический анализ ориентировок  $P$  и  $T$  осей, рассчитано региональное поле напряжений и соответствующий ему средний механизм (рис. 2).

Методика определения среднего механизма представлена в работе [Ребецкий,

2007]. Во всех полученных статистических результатах очевидно преобладание северо-западно—юго-восточных направлений (рис. 2, б—г). Максимумы ориентировок  $P$  и  $T$  осей свидетельствуют о преобладании наклонных положений осей северо-западных и юго-восточных погружений (см. рис. 2, б), что характерно для перемещения по поверхности горизонтального детачмента [Гинтов, 2005; Ребецкий, 2007]. Региональное поле напряжений, в котором могли осуществиться смещения по всем нодальным площадкам 13 фокальных механизмов, отражает деформационный режим горизонтального сжатия в северо-западно—юго-восточном направлении (см. рис. 2, в). Для известных ориентировок главных осей регионального поля напряжений рассчитан средний механизм (см. рис. 2, г). Обе нодальные плоскости среднего механизма, который от-

носится к взбросовому типу, ориентированы в северо-восточном направлении и субортогональны простиранию КСЗ в районе Южного берега Крыма. Все перечисленные результаты отражают генерализованный процесс сжатия и укорочения в северо-западном направлении, при том что перемещения по отдельным нодальным

плоскостям реализуются в различных направлениях, что связано с изменением во времени и пространстве полей напряжений второго порядка.

**Определение полей палеонапряжений по анализу тектонических зеркал с бороздами скольжения.** Систематическое тектонофизическое изучение ГК было нача-

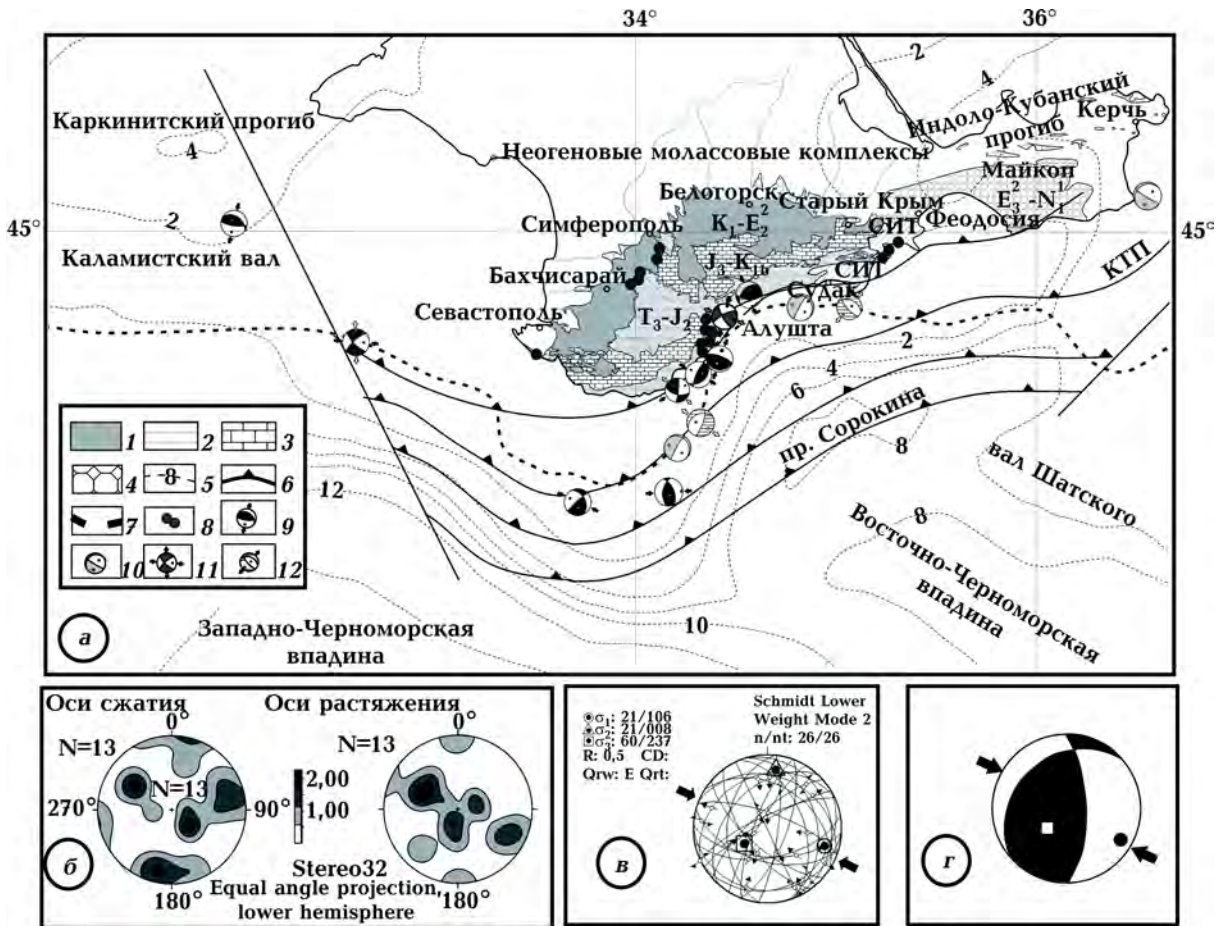


Рис. 2. Положение 13 механизмов очагов землетрясений КСЗ и их анализ: а — тектоническая схема Горного Крыма и прилегающей окраины Черного моря, по [Муратов, 1969; Finetti et al., 1987; Nikishin et al., 2017; Туголесов и др., 1985; Гобаренко и др., 2016]. Геологические комплексы в пределах ГК: 1 — флишевые и вулканогенно-осадочные комплексы верхнего триаса—средней юры; 2 — шельфовые известняки и конгломераты верхней юры—берриаса; 3 — терригенные и карбонатные отложения нижнего мела—эоцена; 4 — отложения глубоководного молассового бассейна олигоцена—нижнего миоцена (СИТ — Судакский инвертированный трог); 5 — крупные выходы магматических пород средней юры—берриаса; 6—8 — структурные элементы северной окраины Черного моря: 6 — глубина залегания домелового фундамента; 7 — подошва континентального склона; 8 — Южно-Крымский надвиговый фронт и ограничивающий его с запада Одесско-Синопский разлом; 9—12 — положение и механизмы очагов землетрясений с  $M > 4$ : 9 — взбросового типа; 10 — покровного типа; 11 — сдвигового типа; 12 — сбросового типа; КТП — Керченско-Таманский прогиб; б — стереограммы ориентировок Р и Т осей 13 механизмов очагов землетрясений; в — поле напряжений, рассчитанное для 13 механизмов очагов землетрясений методом правой дигетры [Delvaux, Sperner, 2003]; г — средний механизм для 13 механизмов очагов землетрясений, рассчитанный по полю напряжений на рис. 2, в.

то в 1989 г. сотрудниками отдела тектонофизики ИГФ НАН Украины под руководством О.Б. Гинтова. На основании исследований группы были выделены 24 этапа деформации в пределах ГК на протяжении мезозоя и кайнозоя [Гинтов, 2005]. Ю.М. Вольфман поставил восстановленные по тектонофизическим данным поля напряжений в соответствие периодам трансгрессий — регрессий в пределах Крыма и Северного Причерноморья и обосновал цикличность смены их ориентировок [Вольфман, 2015].

В работе [Saintot et al., 1999] поля напряжений, определенные по тектоническим зеркалам (структурам мезоуровня), поставлены в соответствие с кинематикой региональных разломов (структур макроуровня) и предложена идея о нескольких генерализованных этапах деформации.

В.В. Гончар проводил многолетние тектонофизические исследования в ГК. На основании обобщения всех имеющихся геофизических данных и с помощью математического моделирования методом конечных элементов он обосновал коллизийную модель Крымского орогена [Гончар, 2013] и механизм латеральной экструзии земной коры ГК [Гончар, 2015].

В перечисленных исследованиях сделаны различные выводы, в первую очередь относительно количества и последовательности этапов деформации, что свидетельствует, что этот вопрос все еще остается открытым.

**Методика.** Как показали эти и другие тектонофизические исследования, наиболее значительной проблемой при работе с полями напряжений является их временная привязка и тектоническая интерпретация. Достаточно остро эта проблема стоит для ГК, где подавляющее большинство зеркал скольжения было обнаружено в относительно древних породах (от позднего триаса до раннего мела), что само по себе позволяет предполагать возрастные рамки деформации от позднего триаса до современности. Также было показано на большом количестве фактического материала по механизмам очагов зем-

летрясений, например для сейсмогенной зоны Загроса [Гинтов и др., 2014], что типы и направления полей напряжений при современном тектогенезе могут изменяться очень быстро (в течение нескольких лет). Это не всегда делает корректным выделение отдельных этапов деформации по ориентировкам или типам полей напряжений. Многочисленные эксперименты по аналоговому моделированию также показывают наличие полей напряжений разных порядков и типов, а также их изменение даже в ходе одного модельного эксперимента без изменений условий нагружения, например, [Осокина, Фридман, 1987].

Поэтому мы привязали поля напряжений ко времени и выполнили их интерпретацию в тесной связи с нашими геолого-структурными наблюдениями и региональным тектоническим контекстом. Особенность нашего методологического подхода — интерпретация полей напряжений в рамках двух генерализованных этапов: растяжения в раннем мелу и сжатия в кайнозое—квартере, временные рамки которых получены независимыми от тектонофизики методами. Впервые такой подход обоснован и применен в работе [Муровская и др., 2014] для ЗГК.

При полевых работах использовался весь арсенал геолого-структурных и тектонофизических методов. Обработка и интерпретация зеркал скольжения и механизмов очагов землетрясений осуществлялась кинематическим методом с применением программы Win Tensor [Delvaux, Sperner, 2003]. Представление тектонических зеркал и осей главных нормальных напряжений выполнялось на проекции нижней полусферы (сетке Вульфа). В соответствии с ориентировкой главных осей поля напряжений разделили, аналогично механизмам землетрясений, на четыре группы: взбросовые, сбросовые, сдвиговые и покровные.

**Данные и результаты.** В табл. 1 и 2 представлены результаты определения полей напряжений и деформационных режимов для 105 пунктов наблюдения. Для удобства ГК разделен на западную (ЗГК) и вос-

точную (ВГК) части по линии Симферополь—Алушта и используется самостоятельная нумерация обнажений для каждой из частей.

На основании дешифрирования космоснимков и наших полевых наблюдений [Sheremet, 2016a] составлена схема разломов ГК на фоне 3D-рельефа, в каждой точке наблюдения вынесены ориентировки действующих осей (осей сжатия для взбросовых, покровных и сдвиговых деформационных режимов и осей растяжения для сбросовых деформационных режимов). На рис. 3, а представлены ориентировки осей сжатия в соответствующих пунктах наблюдений для полей взбросового и покровного типа.

Далее были проведены линии (траектории) субпараллельно осям сжатия, которые демонстрируют направление сокращения. Направление траекторий сжатия различно на разных участках изученной территории и в целом образует веерообразный рисунок в наиболее прогнутой части ГК от м. Аю-Даг до м. Меганом. Аналогичным образом вынесены оси сжатия для сдвиговых деформационных режимов и проведены субпараллельные им траектории (рис. 3, б). Рисунок траекторий сжатия для сдвиговых полей подобен такому для полей взбросового типа. Параллельность траекторий сжатия для обоих деформационных режимов позволила проинтерпретировать их совместно и причислить к общему этапу деформации.

**Этап кайнозойского сжатия.** Мы связываем поля напряжения взбросового, покровного и сдвигового типов с этапом кайнозойского сжатия. Подобный рисунок осей сжатия для данных полей позволил объединить их на одной схеме и провести траектории сжатия, которые на языке деформации показывают направление сокращения (рис. 3, в, г). В центральной части ГК преобладает юго-восточная ориентировка траекторий сжатия. К востоку от центра направление сжатия изменяется на меридиональное, а к западу становится северо-восточным, формируя веерообразный рисунок в наиболее прогнутой

части ГК от м. Аю-Даг до м. Меганом. Мы связываем такое распределение траекторий сжатия с дугообразной (выпуклой на северо-запад) формой надвигового фронта. Юго-западная часть ГК характеризуется юго-западным—северо-восточным направлением сжатия.

Для участков с однородными по направлению осями сжатия построены осредненные поля напряжений. В самой восточной части ГК (Судакско-Феодосийской зоне (СФЗ)) осредненные поля напряжений относятся к взбросовому типу, а для центральной и западной частей ГК они представлены сдвиговыми типами (рис. 3, в, г).

Геолого-структурные наблюдения, выполненные в ГК в рамках IRG проекта (2013—2017) позволили описать и закартировать многочисленные структуры сокращения, отраженные на структурной карте и разрезах [Sheremet et al., 2016b] и связанные с деформационными режимами сжатия. Такого рода структуры (асимметричные антиклинальные принадвиговые складки, шевронные складки, зоны надвигов, тектонические зеркала взбросового типа и др.) наиболее типичны для СФЗ (рис. 4, а).

В центральной и западной частях Главной гряды Крымских гор в зоне развития яйл (в целом моноклинально залегающих известняковых массивов оксфорд-берриасского возраста) [Nikishin et al., 2017 и ссылки в ней] преобладают разрывные нарушения сдвигового типа по крутопадающим разрывам, сопряженные с горизонтальными перемещениями по пологим плоскостям напластования или стратиграфических контактов.

Надвиговые структуры зафиксированы в районе Южного берега Крыма на контактах различных по реологии породных комплексов, один из которых — Балаклавский надвиг (табл. 2, п. 2) — впервые описан в работе [Гинтов, 2005] и продемонстрирован на рис. 4, а, б. Взбросовые зеркала скольжения зафиксированы также вдоль краевого взброса, ограничивающего известняковые массивы Главной гряды с севера (например, в Узунджинском

каньоне, в долине р. Бельбек, в районе с. Плотинное, в диабазовых карьерах в районе с. Счастлиное и т. д. (см. табл. 2, п. 25, 31, 35)).

**Этап мелового растяжения.** Было получено значительное количество полей напряжения сбросового типа с различными ориентировками действующей оси растя-

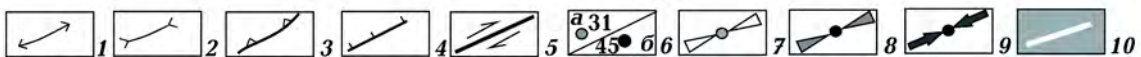
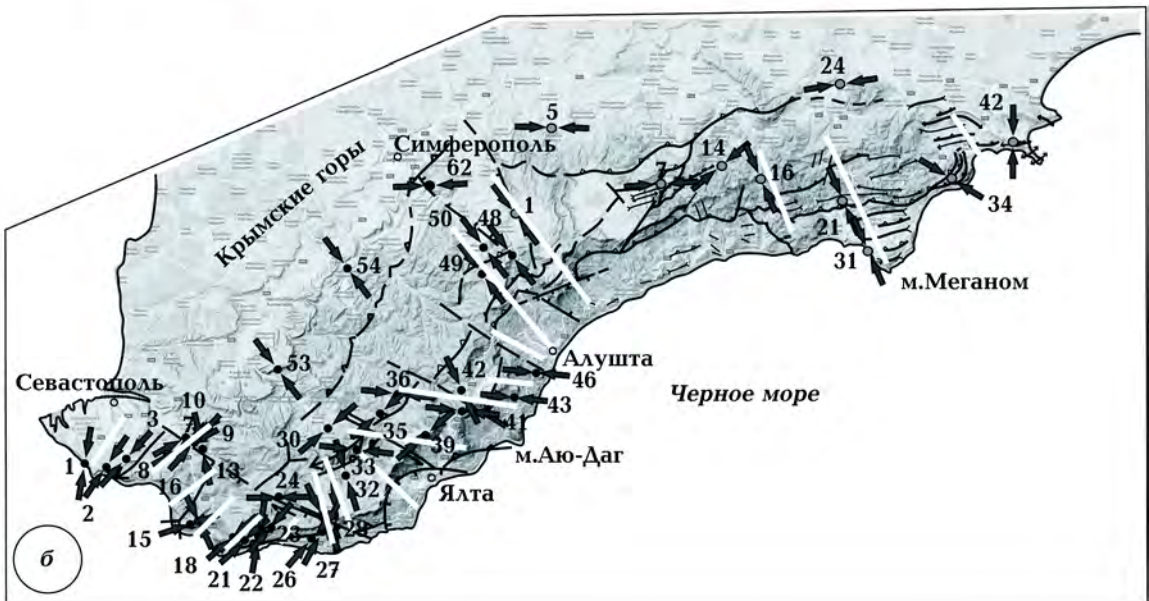
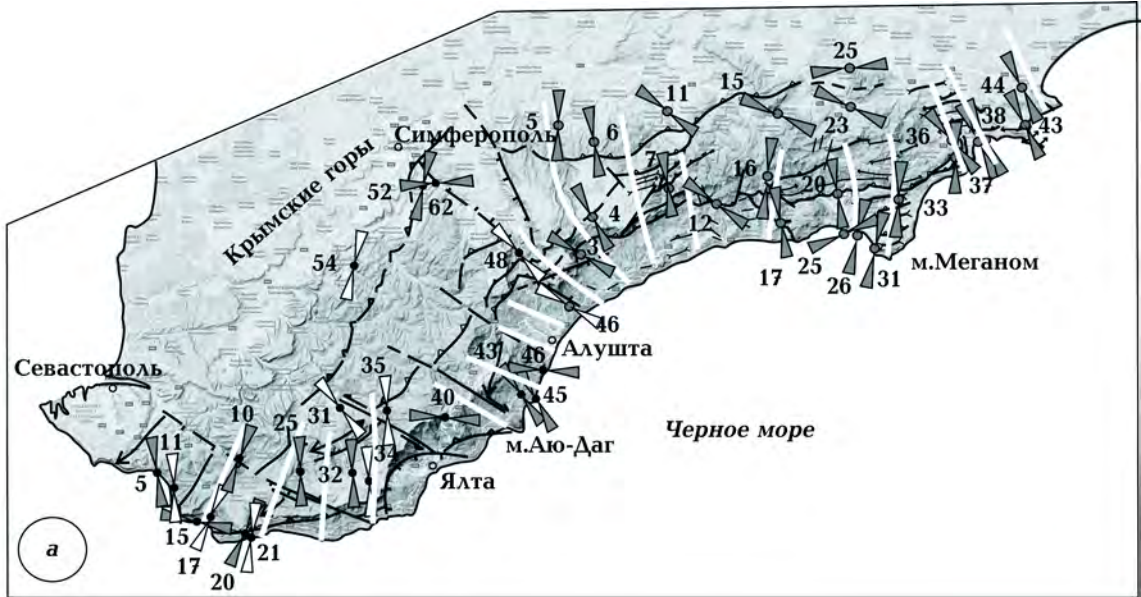
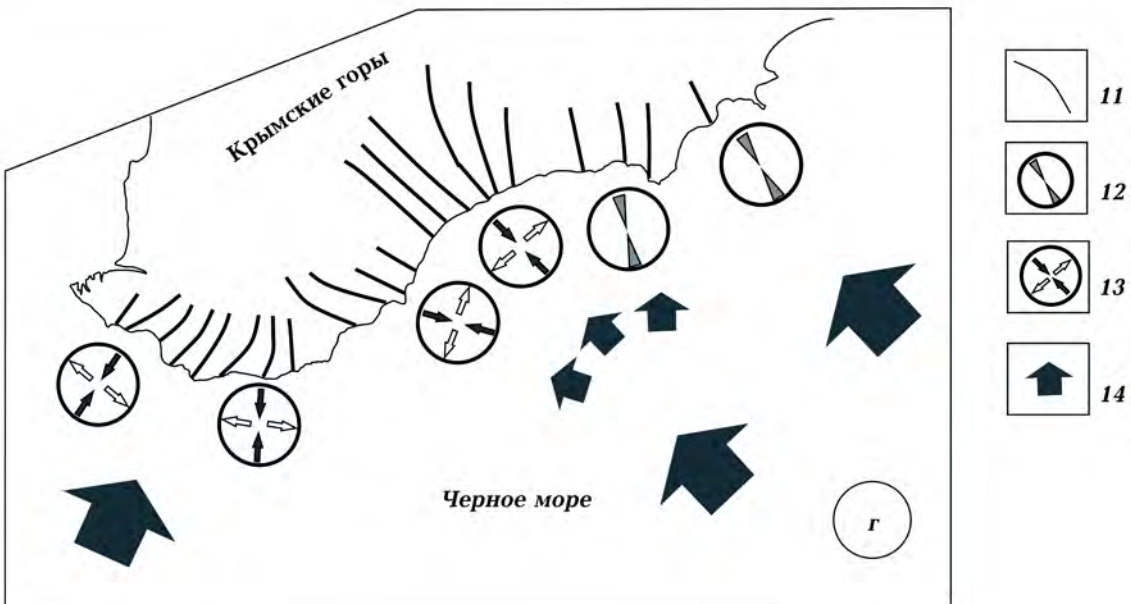
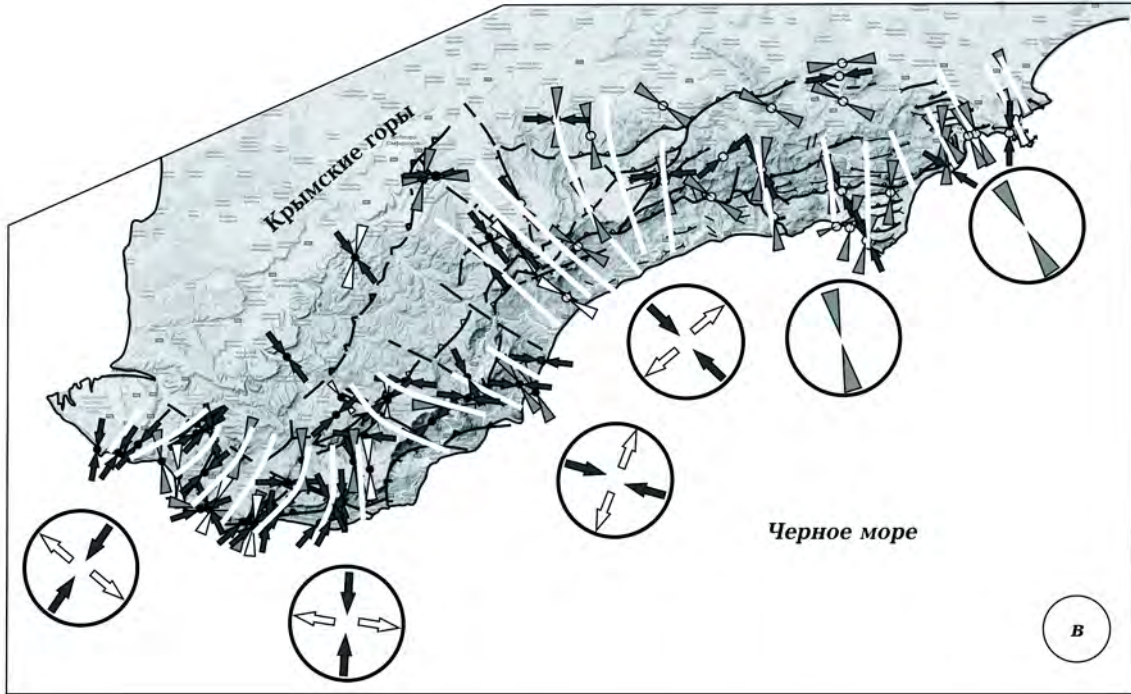


Рис. 3. Построение траекторий сжатия для кайнозойского этапа эволюции Горного Крыма: *а* — ориентировки осей и траекторий жатия для полей взбросового и покровного типов на фоне построенной схемы разломов; *б* — ориентировка осей и траекторий сжатия для полей сдвигового типа; *в* — ориентировка осей и траекторий сжатия для суммы полей взбросового, покровного и сдвигового типов; средние поля напряжений показаны вдоль берега ГК; направление внешнего воздействия показано стрелками; 1, 2 — оси антиклинальных (1) и синклинальных (2) складок; разрывные

жения, которые представлены на рис. 5. Некоторые из изученных сбросовых разрывов на основе наших геолого-структурных наблюдений определены как консе-

диментационные и "работавшие" в раннемеловое время [Муровская и др., 2014]. Система параллельных сбросов СЗ 290—300° ориентировки пересекает верхнеюр-



нарушения: 3 — надвиги, 4 — сбросы, 5 — сдвиги; 6 — пункты наблюдений и их номера (а — для ВГК, б — для ЗГК); ориентировка оси сжатия для различных типов полей напряжений: 7 — покровного, 8 — взбросового, 9 — сдвигового; 10 — траектории сжатия; г — схематическое изображение траекторий сжатия и направления внешнего воздействия: 11 — траектории сжатия; 12 — осредненное поле напряжений взбросового типа; 13 — осредненное поле напряжений сдвигового типа; 14 — направление внешних сил.

**Т а б л и ц а 1. Пункты тектонофизических наблюдений и результаты определения полей напряжений для ВГК**

Номер обнажения	Долгота	Широта	Литология, возраст пород	Тип поля напряжения	Ось сжатия (угол/азимут)	Ось растяжения (угол/азимут)
1	34.34333°	44.87°	Песчаник, К <sub>1</sub>	Сдвиг	11/149	5/240
2	34°24'8.70"	44°45'16.00"	Конгломерат, J <sub>3</sub>	Сброс	69/058	20/214
3	34°27'32.70"	44°48'25.56"	Конгломерат, J <sub>3</sub>	Взброс	02/200	63/03
4	34.48333°	44.86015°	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	20/157	61/348
5	34.415°	44.991°	Известняк, К <sub>1</sub>	Взброс, сдвиг	20/179 0/83	70/357 5/173
6	34.486667°	44.966667°	Известняк, К <sub>1</sub>	Взброс	04/170	63/071
7	34.6351°	44.901°	Конгломерат, К <sub>1</sub> берриас	Сброс, взброс, сдвиг	48/216 07/344 20/85	07/118 43/076 12/179
9	34.634°	44.911667°	Флиш, К <sub>1</sub> берриас	Сброс	75/340	14/149
11	34.634°	45.0101°	Известняк, К <sub>1</sub>	Взброс	21/296	57/170
12	34°43'44.7"	44°52'33.09"	Флиш, J <sub>1</sub>	Сброс, взброс	37/020 24/293	14/120 52/168
13	34.7093°	44.9363°	Известняк, К <sub>1</sub>	Сброс	86/90	03/315
14	34.75737°	44.93475°	Флиш, К <sub>1</sub>	Сдвиг	17/47	9/314
15	34°51'24.09"	45°0'10.86"	Известняк, Е <sub>1</sub>	Взброс	23/302	67/108
16	34.835467°	44.9175°	Флиш, J <sub>1</sub>	Взброс, сдвиг	0/002 2/342	46/101 3/72
17	34°51'44.464"	4°50'56.27"	Конгломерат, J <sub>2</sub>	Сброс, взброс	72/193 10/175	07/082 39/77
18	34.90055°	44.82065°	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	59/057	09/162
20	35.000633°	44.886433°	Конгломерат, J <sub>3</sub>	Взброс	7/345	38/244



Номер обнажения	Долгота	Широта	Литология, возраст пород	Тип поля напряжения	Ось сжатия (угол/азимут)	Ось растяжения (угол/азимут)
21	34°58'52.94"	44°53'33.88"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	10/343	10/251
23	35.005383°	45.0162°	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс, взброс	72/104 4/100	08/348 85/315
24	35°0'1.76"	45°3'8.97"	Конгломерат, J <sub>3</sub>	Сдвиг	14/77	11/170
25	35.005983°	45.073017°	Конгломерат, J <sub>3</sub>	Взброс, сдвиг	2/77	62/171
26	35°1'7.85"	44°49'58.28"	Конгломерат, J <sub>2</sub>	Взброс	16/9	40/123
27	34°59'18.07"	44°50'2.85"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс взброс	36/158 6/231	09/355 42/130
31	35°3'2.89"	44°48'33.73"	Флиш, J <sub>1</sub>	Взброс, сдвиг	12/26 4/345	20/285 2/75
33	35.09925°	44.889250°	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	14/6	52/258
34	35°13'21.13"	44°55'5.63"	Вулканит, K <sub>1</sub>	Сдвиг	29/108	22/21
35	35°13'6.69"	44°56'37.11"	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	1/179	89/359
36	35.211483°	44.968417°	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	5/318	81/197
37	35.264533°	44.966500°	Флиш, J <sub>2</sub>	Сброс, взброс	74/260 15/162	16/093 48/054
38	35.278133°	44.969050°	Флиш, J <sub>2</sub>	Взброс	17/338	63/105
42	35.349117°	44.969333°	Конгломерат, J <sub>2</sub>	Сдвиг	9/2	8/94
43	35.360517°	44.990917°	Флиш, J <sub>2</sub>	Взброс	13/328	54/76
44	35°21'15.64"	45°2'35.44"	Мергель, E <sub>2</sub>	Взброс	7/328	79/98
45	36°29'32.79"	45°19'2.22"	Известняк, N <sub>1</sub>	Покров	49/184	41/360
46	34°26'42.63"	44°44'2.93"	Конгломерат, J <sub>3</sub>	Покров	35/264	53/60

**Т а б л и ц а 2. Пункты тектонофизических наблюдений и результаты определения полей напряжений для ЗГК**

Номер пункта наблюдения	Долгота	Широта	Литология, возраст пород	Тип поля	Ось сжатия (угол/азимут)	Ось растяжения (угол/азимут)
1	33° 28' 54"	44° 30' 31"	Известняк, N <sub>1</sub>	Сдвиг	37/18	13/278
2	33° 31' 28"	44° 30' 11"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	17/216	29/117
3	44° 31' 11"	33° 33' 53"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс, сдвиг	74/293 14/37	14/148 27/300
4	33° 35' 43"	44° 29' 48"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	58/216	08/318
5	33° 36' 42"	44° 29' 30"	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	9/170	71/275
7	33° 40' 54"	44° 32' 48"	Мергель, K <sub>2</sub>	Сдвиг	31/242	1/333
8	33° 40' 58"	44° 31' 56"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	0/252	21/342
9	33° 42' 1"	44° 32' 21"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	4/46	8/316
10	33° 43' 00"	44° 31' 48"	Известняк, K <sub>1</sub>	Сдвиг	5/343	4/73
10в	44° 30' 60"	33° 46' 10"	Известняк, K <sub>1</sub>	Взброс	30/28	37/143
11	33° 38' 50"	44° 28' 17"	Конгломерат, J <sub>3</sub>	Покров	43/169	41/6
12	33° 41' 36"	44° 28' 46"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	68/22	22/200
13	33° 42' 0.00"	44° 28' 36"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	2/43	11/313
14	33° 41' 602"	44° 28' 757"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	78/170	11/005
15	33° 41' 34"	44° 25' 24"	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс, сдвиг	0/283 1/81	85/16 27/350
16	33° 42' 28"	44° 25' 43"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс, сдвиг	49/265 7/136	03/171 17/44
17	33° 43' 09"	44° 25' 49"	Известняк, J <sub>3</sub>	Покров	30/66	49/198
18	33° 46' 48"	44° 24' 18"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс, сдвиг	79/201 3/46	11/025 7/136

Номер пункта наблюдения	Долгота	Широта	Литология, возраст пород	Тип поля	Ось сжатия (угол/азимут)	Ось растяжения (угол/азимут)
19	33° 47' 14"	44° 24' 24"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	68/125	02/032
20	33° 47' 39"	44° 24' 21"	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	7/32	77/272
21	33° 47' 53"	44° 24' 03"	Вулканик, J <sub>2</sub>	Взброс, сдвиг	31/13 35/244	49/147 3/336
22	33° 49' 39"	44° 24' 22"	Вулканик, J <sub>2</sub>	Сдвиг	29/15	16/275
23	33° 51' 12"	44° 25' 09"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс, сдвиг	60/095 0/61	09/201 7/151
24	33° 52' 04"	44° 27' 47"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс, сдвиг	77/070 21/276	08/196 13/181
25	33,895367	44,494067	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	0/180	89/91
26	33° 55' 57"	44° 24' 12"	Флиш, J <sub>2</sub>	Сдвиг	12/222	36/321
27	33° 57' 18"	44° 24' 48"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	23/212	5/304
28	33° 57' 15"	44° 26' 05"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	1/323	11/54
29	33° 58' 41"	44° 26' 14"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	20/179	6/271
30	33° 57' 51"	44° 33' 34"	Диабаз, J <sub>2</sub>	Сдвиг	5/46	12/315
31	33° 58' 30"	44° 35' 06"	Флиш, J <sub>2</sub>	Покров	43/142	42/332
32	34° 00' 00"	44° 29' 36"	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс, сдвиг	6/359 4/338	77/245 4/248
33	34° 01' 18"	44° 33' 34"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	10/278	8/10
34	34° 01' 55"	44° 28' 56"	Известняк, J <sub>3</sub>	Покров	34/335	49/194
35	34° 04' 05"	44° 34' 51"	Диабаз, J <sub>2</sub>	Сброс, покров, сдвиг	86/076 36/159 11/213	03/289 46/19 22/308
36	34° 06' 01"	44° 36' 30"	Флиш, T <sub>3</sub> —J <sub>1</sub>	Сброс, сдвиг	73/052 8/269	04/155 18/176

Номер пункта наблюдения	Долгота	Широта	Литология, возраст пород	Тип поля	Ось сжатия (угол/азимут)	Ось растяжения (угол/азимут)
37	34° 08' 12"	44° 30' 42"	Глинистый известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	83/278	03/165
38	34° 10' 37"	44° 31' 40"	Слоистый известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	85/171	03/309
39	34° 09' 26"	44° 33' 00"	Слоистый известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	7/39	1/309
40	34° 10' 58"	44° 34' 17"	Слоистый известняк, J <sub>3</sub>	Взброс	27/286	56/148
41	34° 13' 44"	44° 35' 02"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс, сдвиг	56/087 24/99	16/202 5/191
42	34° 13' 40"	44° 36' 49"	Известняк, J <sub>3</sub>	Взброс, сдвиг	15/137 31/150	69/272 6/244
43	34° 20' 05"	44° 36' 12"	Диорит, J <sub>2</sub>	Сдвиг	0/259	8/169
44	34° 14' 37"	44° 38' 35"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сброс	41/100	05/194
45	34° 22' 02"	44° 35' 28"	Диабаз, J <sub>2</sub>	Взброс	27/337	63/158
46	34° 22' 45"	44° 38' 14"	Диорит, J <sub>2</sub>	Взброс, сдвиг	7/92 15/98	40/355 23/2
47	34° 19' 57"	44° 45' 14"	Флиш, T <sub>3</sub> —J <sub>1</sub>	Сброс	65/333	10/085
48	34° 20' 09"	44° 48' 03"	Флиш, T <sub>3</sub> —J <sub>1</sub>	Покров	41/332	32/184
49	34° 16' 15"	44° 46' 50"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	19/148	11/58
50	34° 16' 35"	44° 49' 08"	Известняк, J <sub>3</sub>	Сдвиг	1/136	6/226
52	34° 08' 33"	44° 53' 53"	Диабаз, J <sub>2</sub>	Взброс	26/5	59/148
54	34° 00' 13"	44° 47' 8"	Андезит, J <sub>2</sub>	Покров, сдвиг	42/18 19/312	47/180 3/43
57	33° 53' 46"	44° 44' 49"	Известняк, E <sub>1</sub>	Сдвиг	12/304	6/35
61	33° 51' 18"	44° 33' 12"	Песчаник, K <sub>1</sub>	Сброс	47/100	03/007
62	34.16935°	44.909267	Диабаз, J <sub>2</sub>	Взброс,	2/271	64/4

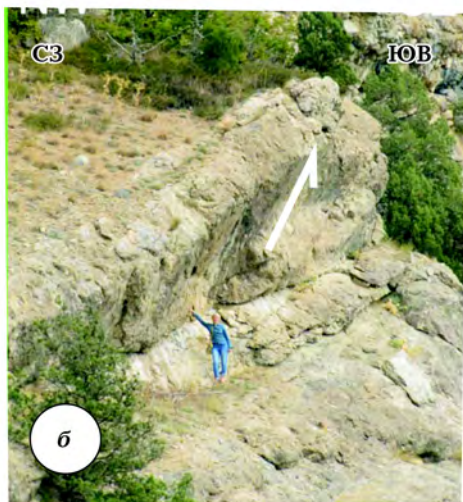
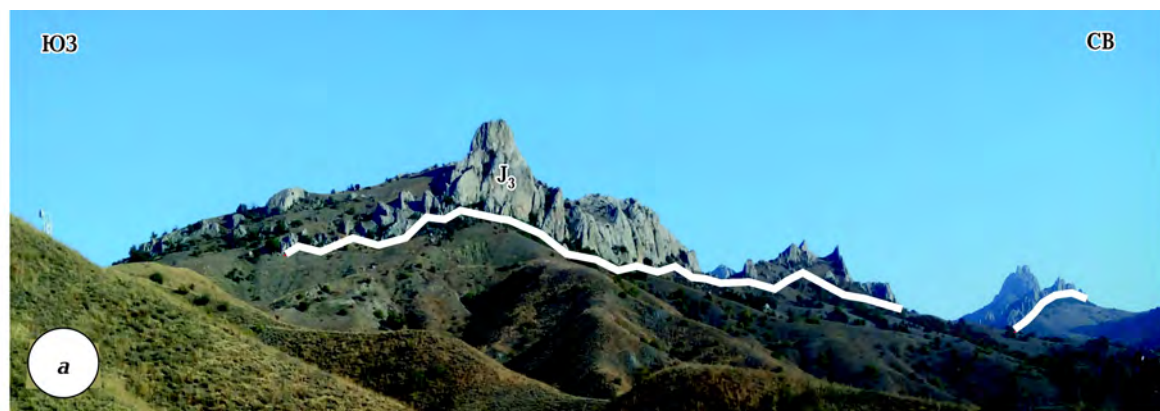


Рис. 4. Примеры структур сжатия и растяжения: *а* — полоса выходов крутопадающих верхнеюрских известняков протягивается в широтном направлении и маркирует фронт надвига, северо-западная окраина пгт Курортное (крайний справа гребень — г. Сюрю-Кая (табл. 1, п. 35)); *б* — Балаклавский надвиг на восточной окраине пгт Балаклава (табл. 2, п. 2) активировался по несогласному стратиграфическому контакту на этапе кайнозойского сжатия; *в* — сбросовый разлом на восточном склоне г. Южная Демерджи (табл. 1, п. 2) ограничивает с запада раннемеловую Салгирскую депрессию; *г* — верхнеюрская карбонатная платформа, нарушенная сбросовыми разрывами, активированными на этапе плиоценового воздымания ГК (вид со стороны пгт Берегово (табл. 2, п. 28, 29)). Стрелки показывают направление перемещения висячего крыла.

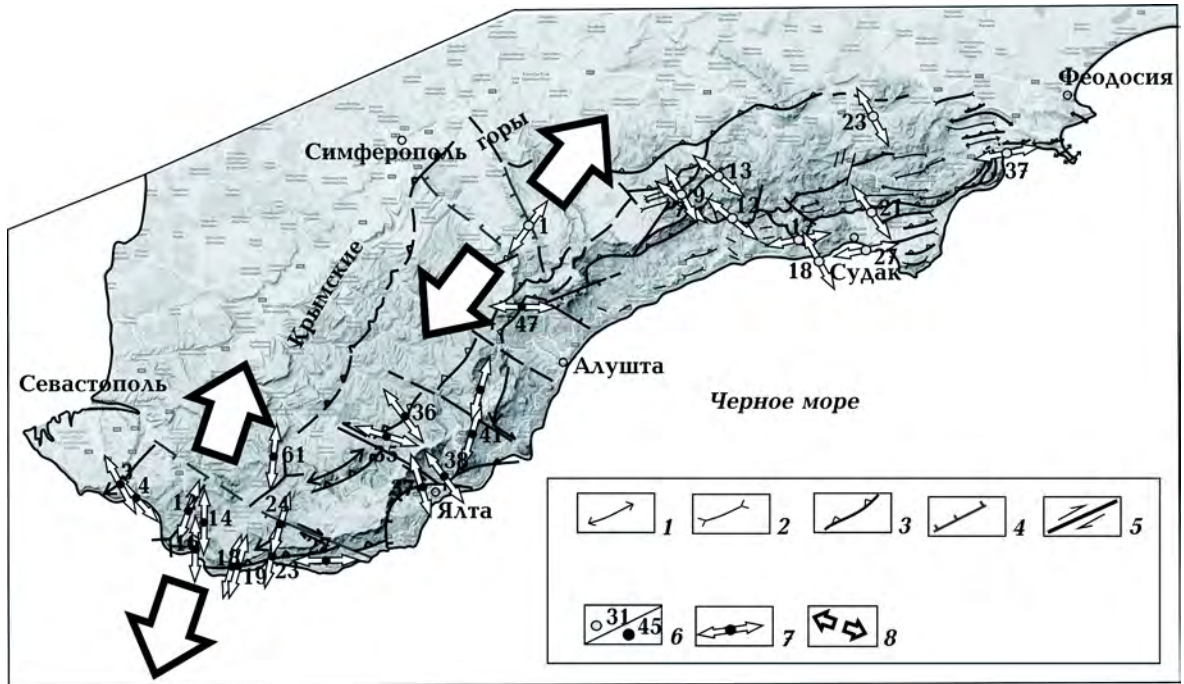


Рис. 5. Ориентировка осей растяжения для полей напряжений сбросового типа: 1—6 см. на рис. 3; 7 — ориентировка действующей оси растяжения для полей сбросового типа; 8 — ориентировка ранне-мелового растяжения определена для групп конседиментационных сбросовых нарушений.

ские-берриасовые известняки Айпетринской яйлы в ЗГК и отчетливо просматривается со стороны южного крутого склона (рис. 4, г, табл. 2, п. 28, 29).

В центральной части ГК были обнаружены крупные тектонические зеркала сбросового типа, ограничивающие Салгирскую эрозионно-тектоническую депрессию с востока и открывшееся в результате крупного обвала в районе поселка Лучистое у западного подножья г. Южная Демерджи (см. рис. 4, б, табл. 1, п. 2). Для двух названных участков была восстановлена несколько различная ориентировка раннемелового растяжения: юго-юго-запад—северо-северо-восток в ЗГК и юго-запад—северо-восток в центральной части ГК (рис. 5).

**Обсуждение результатов.** Геологическая эволюция ГК тесно связана с событиями, происходившими на южной окраине Восточно-Европейской платформы — открытием и эволюцией Черноморского бассейна, а также инверсией его окраин и формированием окаймляющих горно-

складчатых сооружений. Отпечатки этих процессов сохранились в той или иной мере в вещественноструктурных комплексах регионального масштаба и деформационных элементах мезоуровня (в пределах отдельных обнажений). При этом следы более древних событий “затерлись” более молодыми, будучи для них общим фоном, а следы последних событий сохранились более отчетливо. Поэтому будем рассматривать эволюцию полей напряжений с настоящего момента и двигаться в обратном направлении — в глубину времен.

Сейсмичность в пределах КСЗ является индикатором современных тектонических процессов, которые продолжают этап кайнозойского сжатия. Большинство очагов сильных землетрясений КСЗ расположены в полосе между Южным берегом Крыма и подошвой континентального склона и свидетельствуют о том, что основной тектонический процесс происходит именно здесь, в зоне взаимодействия Скифской плиты и Черноморской мик-

роплиты, а структуры северной окраины ЧМ и ГК взаимосвязаны единым геодинамическим процессом.

Как показано в работе [Гобаренко и др., 2016], сейсмичность в пределах КСЗ неравномерно распределяется по глубине и по простиранию зоны, а гипоцентры слабых землетрясений формируют отдельные скопления, среди которых: Севастопольский, Ялтинско-Алуштинский, Судакский и Керченско-Таманский кластеры [Гобаренко и др., 2016]. Это свидетельствует о существовании вещественно-структурно-кинематических неоднородностей в зоне коллизионного взаимодействия и реактивации древних субвертикальных и субгоризонтальных ослабленных зон в земной коре КСЗ.

Для расшифровки характера и особенностей современного деформационного процесса в регионе привлечены механизмы очагов сильных землетрясений КСЗ. В Ялтинско-Алуштинской подзоне в месте максимального изгиба береговой линии и наиболее узкого шельфа механизмы трех землетрясений указывают на взбросовый тип деформаций и свидетельствуют о разрядке здесь напряжений сжатия в юго-восточно—северо-западном и юго-западно—северо-восточном направлениях (см. рис. 2). Два механизма взбросового типа, расположенные в месте максимального южного выступа КСЗ, также демонстрируют разрядку напряжений сжатия. Цепочка из пяти очагов с различными типами механизмов, прослеживающихся на юг по меридиану Ялта—Симферополь, очевидно, связана с активизацией древней тектонической зоны, которая, по мнению некоторых авторов [Гинтов, 2005; Гобаренко и др., 2016 и ссылки в них], разделяет ЗГК и ВГК.

Судакско-Феодосийский участок в целом характеризуется более низким уровнем сейсмичности по сравнению с Ялтинско-Алуштинским сектором. Здесь зафиксированы два сильных землетрясения с механизмами сбросового и покровного (или взбросо-сбросового) типов (см. рис. 2). Эти особенности свидетельствуют о

меньшем объеме накапливаемой здесь упругой энергии, что может быть связано с реологическими особенностями сейсмогенерирующей среды.

Этап кайнозойского сжатия в ГК, обусловленный коллизионными процессами, начался в олигоцене [Finetti et al., 1988; Паталах и др., 2003; Гончар, 2013, 2015; Nikishin et al., 2017] или в палеоцене [Sheremet et al., 2016b]. Как показывают наши тектонофизические и геолого-структурные наблюдения [Муровская и др., 2014; Sheremet et al., 2016a] и сейсмогеологические разрезы [Finetti et al., 1988; Nikishin et al., 2015a, b], на этапе сжатия на суше и шельфе инвертируются древние тектонические нарушения, связанные с этапом растяжения, а также формируется складчато-надвиговая структура в мощной толще олигоцен-плиоценовых осадков прогиба Сорокина.

Этап кайнозойского сжатия в ГК мы характеризуем траекториями сокращения, отражающими суммарный эффект деформаций взбросового, покровного и сдвигового типов. В центральной части ГК (район Чатыр-Дага, Демерджи, Караби) преобладают поля напряжений сдвигового типа с северо-западно—юго-восточной ориентировкой оси сжатия, что согласуется, например, с результатами геолого-структурных наблюдений для Долгоруковской яйлы, состоящей из серии аллохтонных пластин северо-восточного простирания [Милеев и др., 1998].

Пространственное распределение типов полей напряжений по полевым тектонофизическим исследованиям свидетельствует об отличии СФЗ от западной и центральной частей ГК. В СФЗ преобладают поля напряжений взбросового типа с ориентировкой оси сжатия север—юг или северо-северо-запад—юго-юго-восток, которые мы связываем с фазами складчатости и орогенеза в кайнозое—квартере. Ориентировка взбросовых полей напряжений согласуется с субширотным простиранием надвиговых структур в пределах ВГК (см. структурную карту [Sheremet et al., 2016a]).

В геологическом строении и тектонической эволюции СФЗ существуют особенности, отмеченные большинством исследователей, например [Муратов, 1969; Nikishin et al., 2017; Юдин, 2011]. На тектонической схеме (см. рис. 2) к востоку от линии Судак—Старый Крым расположен Судакский синклинорий [Муратов, 1969], который входит в состав Судакского трога и простирается в северо-восточном направлении до Феодосии [Nikishin et al., 2017]. Начиная со средней юры, в Судакском троге отмечаются более глубоководные фации, чем к западу от него, а осадконакопление в его пределах происходит непрерывно вплоть до эоцена [Nikishin et al., 2017]. В результате здесь была отложена мощная толща слоистых пластичных образований, деформированная, выведенная на земную поверхность и эродированная на этапе кайнозойского сжатия.

К западу от Алушты (район г. Кагель, Бабуган-яйлы, южный склон Качинского поднятия) и до м. Аю-Даг тренд сжатия становится субширотным. Это соответствует области разворота северо-восточных структур ЗГК в меридиональном направлении, характерном для Салгирской депрессии и Чатыр-Дага. В работах [Гончар, 2013, 2015; Гинтов, 2005] дугообразный разворот структур ЗГК связан со структурами подворота при левосдвиговом перемещении по Салгино-Октябрьскому разлому [Гончар, 2013, 2015]. Очевидно, на этапе кайнозойского сжатия зона субмеридионального разлома имела/имеет взбросовую компоненту, чем и объясняются субширотные направления наших траекторий сокращения, а также взбросовые составляющие в механизмах очагов вдоль ее продолжения в ЧМ.

В целом, в дугообразном секторе Южного берега Крыма от м. Меганом до м. Аю-Даг получено веерообразное распределение напряжений сжатия. Подобный рисунок траекторий был получен в работах [Паталаха и др., 2003; Гончар, 2015] при математическом моделировании методом конечных элементов в рамках коллизионной модели и объясняется инденторным воз-

действием Восточно-Черноморской впадины на южную окраину Скифской плиты.

Юго-западная часть ГК характеризуется юго-западным—северо-восточным направлением сжатия. Следует отметить, что такой, несколько неожиданный тренд отмечался некоторыми авторами и раньше [Гинтов, 2005; Вольфман, 2015 и ссылки в них]. Для его объяснения нет однозначного ответа. Взбросовые режимы юго-западного сжатия, возможно, возникли в результате активации древних сбросов на кайнозойском этапе. Сдвиговые режимы могут быть связаны с кинематикой Западно-Черноморского правого сдвига, ограничивающего с запада южно-крымский надвиговый фронт. Аналогичное юго-западное направление сжатия получено Ж.-К. Ипполитом для Центральных Понтид и связывается автором с коллизией Тавро-Анатолийского блока с Понтидами [Hippolyte et al., 2010, 2016].

Этап растяжения в ЗГК начинается в валанжин-барремское время и достигает максимальной интенсивности в аптское. Он подтверждается конседиментационным сбросообразованием и формированием олистостромовых комплексов на протяжении практически всего раннего мела.

Нашим исследованием выявлен ряд молодых сбросовых зеркал и соответствующих деформационных режимов растяжения. Эти сбросовые разрывы мы связываем с влиянием гравитации и активизацией более древних разломов при воздымании в плиоцене ГК [Муровская, 2012; Муровская и др., 2014].

**Выводы.** В данном исследовании рассмотрена эволюция ГК и прилегающей части ЧМ во временном интервале от раннего мела до настоящего времени. Региональная геологическая ситуация в Циркум-Черноморском регионе и наши геолого-структурные наблюдения позволили выделить два генерализованных этапа в эволюции изученной территории: мелового растяжения и кайнозойского сжатия, продолжающегося и в настоящее время. Тектонофизические наблюдения и анализ механизмов землетрясений позволили уточ-



нить ориентировку растяжения и сжатия, а также особенности пространственного распределения деформации.

Раннемеловое растяжение проявилось в деструкции верхнеюрской карбонатной платформы по системе сбросовых нарушений. Было получено направление растяжения северо-северо-восток—юго-юго-запад для юго-западной части ГК и направление растяжения северо-восток—юго-запад для его центральной части. Возможно, поля напряжений сбросового типа и соответствующие структуры растяжения связаны с фазой рифтинга и раскрытия ЧМ.

С этапом кайнозойского сжатия авторы связывают поля напряжения взбросового, покровного и сдвигового типов. Для Судакско-Феодосийского района характерны поля напряжений взбросового типа, а для центральной и западной частей ГК — сдвигового. При этом траектории сжатия образуют веерообразный рисунок и изменяют свое направление от северо-южного в Судакской зоне до северо-западно—юго-восточного в центральной зоне, затем до восточно-западного и, наконец, приобретают северо-восточно—юго-западную ориентировку в самой западной части ГК. Веерообразный рисунок траекторий сжатия связывается с дугообразной формой надвигового фронта.

Обобщение механизмов очагов 32 сильных землетрясений в пределах северной окраины ЧМ за 1927—2016 гг. показало преобладание взбросового и покровного деформационных режимов. Ориентировки осей сжатия в очагах относительно ориентировки КСЗ свидетельствуют о том, что современный тектонический процесс

происходит преимущественно в условиях сжатия и транспрессии.

Анализ 13 механизмов очагов землетрясений, расположенных вдоль побережья Крыма в пределах Южно-Крымского надвигового фронта, показывает преобладание взбросовых деформаций в центральной части КСЗ и сдвиговых деформаций на ее западном завершении. Рассчитанный средний механизм относится к взбросовому типу при ориентировке оси сжатия в направлении северо-запад—юго-восток и показывает генерализованное направление сокращения, при этом перемещения по отдельным нодальным плоскостям реализуются в различных направлениях, что связано с изменением во времени и пространстве полей напряжений второго порядка.

С точки зрения деформационных режимов — сжатия и транспрессии и с учетом направления укорочения северо-запад—юго-восток современный тектонический процесс в пределах КСЗ является продолжением этапа кайнозойского сжатия и отражает поддвиг субокеанической коры ВЧМП под континентальную кору Скифской плиты.

**Благодарности.** Полевые тектонофизические работы 2012 г. выполнены в рамках программы Darius 2012 благодаря проф. С. Morhange в рамках проекта AMIDEX-GEOMED Аикс-Марсельского Университета. Обобщение и переинтерпретация полевых материалов 1991—2012 гг. выполнены в рамках IRG проекта по наукам о земле Южного Кавказа 2012—2017 гг. Авторы выражают благодарность О. Гинтову, Ю. Вольфману, Е. Колесниковой за предоставление части полевых материалов.

### Список литературы

Афанасенков А.П., Никишин А.М., Обухов А.Н. Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона. Москва: Научный мир, 2007. 172 с.

Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева И.В.,

Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. Москва: Наука, 1972. 192 с.

Баранова Е.П., Егорова Т.П., Омельченко В.Д.

- Переинтерпретация сейсмических материалов ГСЗ и гравитационное моделирование по профилям 25, 28 и 29 в Черном и Азовском морях. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 5. С. 1—10.
- Бызова С.А. Некоторые вопросы тектоники Горного Крыма. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология.* 1980. № 6. С. 15—25.
- Вольфман Ю.М. Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма. 2. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 100—120. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111328>.
- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Гинтов О.Б., Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Муровская А.В. Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений системы Загрос. *Геодинамика и тектонофизика.* 2014. Т. 5. № 1. С. 305—319. doi: 10.5800/GT-2014-5-1-0129.
- Гобаренко В.С., Муровская А.В., Егорова Т.П., Шеремет Е.Е. Современные коллизионные процессы на северной окраине Черного моря. *Геотектоника.* 2016. № 4. С. 68—87. doi: 10.7868/S0016853X16040020.
- Гончар В.В. К обоснованию механизма латеральной экструзии земной коры Горного Крыма. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 4. С. 145—150. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111135>.
- Гончар В.В. Коллизионная природа Крымского орогена — опыт исследования методом конечных элементов. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 6. С. 148—164. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i6.2013.116526>.
- Костров Б.В. Сейсмический момент, энергия землетрясений и сейсмическое течение горных масс. *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1974. № 1. С. 23—40.
- Милеев В.С., Розанов С.Б., Барабошкин Е.Ю., Шалимов И.В. Особенности внутренних деформаций аллохтонов Горного Крыма. *Докл. АН.* 1998. Т. 358. № 2. С. 233—235.
- Муратов М.В. (ред.). *Геология СССР.* Т. VIII. Крым. Ч. 1. Геологическое описание. Москва: Недра, 1969. 576 с.
- Муровская А.В. Поля напряжений и деформационные режимы Западного Горного Крыма на альпийском этапе тектогенеза по тектонофизическим данным: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев, 2012. 146 с.
- Муровская А., Ипполит Ж.-К., Шеремет Е., Егорова Т., Вольфман Ю., Колесникова К. Деформационные структуры и поля напряжений юго-западного Крыма в контексте эволюции Западно-Черноморского бассейна. *Геодинамика.* 2014. № 2 (17). С. 53—68.
- Осокина Д.Н., Фригман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами. В кн.: *Поля напряжений и деформаций в земной коре.* Москва: Наука, 1987. С. 74—119.
- Паталаха Е.И., Гончар В.В., Сенченков И.К., Червинко О.П. Инденторный механизм в геодинамике Крымско-Черноморского региона. Киев: Эмко, 2003. 226 с.
- Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016 год. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология.* 2017. Т. 4 (70). № 4. С. 36—48.
- Ребецкий Ю.А. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. Москва: Наука, 2007. 406 с.
- Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б., Соловьев В.В., Хахалев В.И. Тектоника Мезо-кайнозойских отложений Черноморской впадины. Москва: Недра, 1985. 215 с.
- Югин В.В. Геодинамика Крыма. Симферополь: Дияйпи, 2011. 335 с.
- Bott M. H. P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.* (96), 109—117.
- Byerlee J. D., 1978. Friction of Rocks. *Pure Appl. Geophys.* 116, 615—626.
- Delvaux D., Sperner B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: *New insights into structural interpretation and modeling.* *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 212, 75—100.

- Dinu C., Wong H.K., Tambrea D., Matenco L., 2005. Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophysics* 410 (1—4), 417—435. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.04.012>.
- Espurt N., Hippolyte J. C., Kaymakci N., Sangu E., 2014. Lithospheric structural control on inversion of the southern margin of the Black Sea Basin, Central Pontides, Turkey. *Lithosphere* 6 (1), 26—34. <http://doi.org/10.1130/L316.1>.
- Görür N., 1997. Cretaceous syn- to post-rift sedimentation on the southern continental margin of the Western Black Sea Basin. In: Robinson A. G. (ed.). *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region*. AAPG Memoir. 68, P. 227—240.
- Finetti I., Bricchi G., Del Ben A., Pipan M., Xuan Z., 1988. Geophysical study of the Black Sea. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* XXX (117-118), 197—324.
- Hippolyte J. C., Espurt N., Kaymakci N., Sangu E., Müller C., 2016. Cross-sectional anatomy and geodynamic evolution of the Central Pontide orogenic belt (northern Turkey). *Int. J. Earth Sci.* 105 (1), 81—106. doi: 10.1007/s00531-015-1170-6.
- Hippolyte J. C., Müller C., Kaymakci N., Sangu E., 2010. Dating of the Black Sea Basin: new nannoplankton ages from its inverted margin in the Central Pontides (Turkey). In: M. Sosson, N. Kaymakci, R. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (eds). *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 340, 113—136. <http://doi.org/10.1144/SP340.7>.
- Khriachtchevskaia O., Stovba S., Stephenson R., 2010. Cretaceous-Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (eds). *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 340, 137—157. doi: 10.1144/SP340.8.
- Munteanu I., Matenco L., Dinu C., Cloetingh S., 2011. Kinematics of back-arc inversion of the Western Black sea Basin. *Tectonics* 30, TC5004. doi: 10.1029/2011TC002865.
- Nikishin A.M., Okay A.I., Tüysüz O., Demirer A., Amelin N., Petrov E., 2015a. The Black Sea basins structure and history: new model based on new deep penetration regional seismic data. Part 1: Basins structure and fill. *Mar. Pet. Geol.* (59), 638—655. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.017>.
- Nikishin A.M., Okay A.I., Tüysüz O., Demirer A., Amelin N., Petrov E., 2015b. The Black Sea basins structure and history: new model based on new deep penetration regional seismic data. Part 2: Tectonic history and paleogeography. *Mar. Pet. Geol.* (59), 656—670. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.018>.
- Nikishin A.M., Wannier M., Alekseev A.S., Al-mendiger O.A., Fokin P.A., Gabdullin R.R., Khudoley A.K., Kopaevich L.F., Mityukov A.V., Petrov E.I., Rubtsova E.V., 2017. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: M. Sosson, R. Stephenson, Sh. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 428, 241—264.
- Okay A. I., Nikishin A. M., 2015. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. *Int. Geol. Rev.* 57 (5—8), 1051—1076. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2015.1010609>.
- Popadyuk I. V., Stovba S. M., Khriachtchevskaia O. I., 2013. The New Geological map of the Crimea Mountains by SPK — Geoservice as a new approach to understanding the Black Sea Region. Abstracts of Darius Programme, Eastern Black Sea — Caucasus Workshop, 24—25 June, 2013, Tbilisi, Georgia, P. 48—50.
- Robinson A., Spadini G., Cloetingh S., Rudat J., 1995. Stratigraphic evolution of the Black Sea inferences from basin modelling. *Mar. Pet. Geol.* 12 (8), 821—835.
- Saintot A., Angelier J., Chorowicz J., 1999. Mechanical significance of structural patterns identified by remote sensing studies: a multiscale analysis of tectonic structures in Crimea. *Tectonophysics* 313 (1-2), 187—218. doi: 10.1016/S0040-1951(99)00196-1.
- Sheremet Y., Sosson M., Müller C., Gintov O., Murovskaya A., Yegorova T., 2016a. Key problems of stratigraphy in the Eastern Crimea Peninsula: some insights from new dating and structural data. In: M. Sosson, R. Stephenson,

- Sh. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 428, 265—305.
- Sheremet Y., Sosson M., Ratzov G., Sydorenko G., Voitsitskiy Z., Yegorova T., Gintov O., Murovskaya A., 2016b. An offshore-onland transect across the north-eastern Black Sea basin (Crimean margin): Evidence of Paleocene to Pliocene two-stage compression. *Tectonophysics* 688, 84—100. doi: 10.1016/j.tecto.2016.09.015.
- Starostenko V.I., Sosson M., Farfulyak L., Gintov O.B., Yegorova T., Murovskaya A., Sheremet Ye., Legostaeva O., 2017. Deep crustal structure of the transition zone of the Scythian Plate and the East European Platform (DOBRE-5 profile): consequences of the Alpine tectonic evolution. *Геофизический журнал* 39(4), 119—121.
- Vavrychuk V., 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophys. J. Int.* 199, 69—77. doi: 10.1093/gji/ggu224.
- Yegorova T., Gobarenko V., 2010. Structure of the Earth's crust and upper mantle of the West- and East-Black Sea Basins revealed from geophysical data and its tectonic implications. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (eds). *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 340, 23—42. doi: 10.1144/SP340.3.
- Zonenshain L.P., Le Pichon X., 1986. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic. *Tectonophysics* 123(1), 181—211. doi: 10.1016/0040-1951(86)90197-6.

## Recent and paleo-stresses at the northern margin of the Black Sea and the Crimea Mountain in Meso-Cenozoic—Quarter (according to mechanisms of earthquakes foci and field tectonophysical data)

© A. Murovskaya, J.-C. Hippolyte, Ye. Sheremet, T. Yegorova, 2018

Recent stress fields at the northern margin of the Black Sea have been characterized on the base of 32 mechanisms of the earthquakes foci. Orientations of compression axes in the foci give evidence that present-day tectonic process takes place under conditions of compression and transpression. For 13 mechanisms located within the band between the southern coast of the Crimea and the base of the continental slope regional stress field has been estimated, which reflects deformational regime of horizontal stress in northwest—southeast direction. The results of specification of paleostresses fields and deformation regimes have been presented according to field tectonophysical observations in 105 sites. Interpretation has been fulfilled within the limits of two generalized stages: extension in the Early Cretaceous and compression in the Cenozoic—Quarter. Stress fields of inverse, nappe and strike-slip types have been attributed to the stage of Cenozoic compression. Generalized paths of compression have been plotted, which form fan-like pattern within the arc-like sector of the South Coast of the Crimea from cape Meganom to cape Ayu-Dag and change their direction from north—east to west—east. Averaged stress fields have been calculated, which are of inverse type in Sudak-Feodosian zone and are represented by strike-slip types for the central and western parts of the Mountain Crimea (MC). The southwestern part of the MC is characterized by strike-slip-type stress field with northwest—northeast direction of the compression axis. The stage of Cretaceous extension is characterized by stress fields of normal type. The southwestern part of MC is characterized by north-north-east—north-north-west trend of extension and for the central part of MC the north-east—south-west direction of extension has been obtained.

**Key words:** the Crimea, the Black Sea, mechanisms of earthquakes foci, stress field, deformational regime, kinematic analysis, Cenozoic compression.

References

- Afanasenkov A. P., Nikishin A. M., Obukhov A. N., 2007. Geological structure and hydrocarbon potential of the East-Black Sea region. Moscow: Nauchnyy Mir, 172 p. (in Russian).
- Balakina L. M., Vvedenskaya A. V., Golubeva I. V., Misharina L. A., Shirokova E. I., 1972. The field of elastic stresses of the Earth and the mechanism of foci of earthquakes. Moscow: Nauka, 192 p. (in Russian).
- Baranova E. P., Yegorova T. P., Omelchenko V. D., 2008. Reinterpretation of seismic materials of DSS and gravity modeling along the profiles 25, 28 and 29 in the Black Sea and the Azov Sea. *Geofizicheskiy zhurnal* 30 (5), 1—10 (in Russian).
- Byzova S. L., 1980. Some issues of tectonics of the Mountainous Crimea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya* (6), 15—25 (in Russian).
- Volfman Yu. M., 2015. Deformation regimes and kinematic conditions of modern tectonic faulting within the limits of the Mountain Crimea. 2. *Geofizicheskiy zhurnal* 37 (1), 100—120. (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111328>.
- Gintov O. B., 2005. Field tectonophysics and its application for the studies of deformations of the Earth's crust of Ukraine. Kiev: Feniks, 572 p. (in Russian).
- Gintov O. B., Volfman Yu. M., Kolesnikova E. Ya., Murovskaya A. V., 2014. Tectonophysical interpretation of earthquake focal mechanisms of the Zagros system. *Geodinamika i tektonofizika* 5 (1), 305—319 (in Russian). doi: 10.5800/GT-2014-5-1-0129.
- Gobarenko V. S., Murovskaya A. V., Yegorova T. P., Sheremet E. E., 2016. Contemporary conflict processes on the northern outskirts of the Black Sea. *Geotektonika* (4), 68—87 (in Russian). doi: 10.7868/S0016853X16040020.
- Gonchar V., 2015. On substantiation of mechanism of lateral extrusion of the crust of the Mountain Crimea. *Geofizicheskiy zhurnal* 37 (4), 145—150 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111135>.
- Gonchar V. V., 2013. Collisional nature of the Crimean orogen — the experience of the finite element method. *Geofizicheskiy zhurnal* 35 (6), 148—164 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i6.2013.116526>.
- Kostrov B. V., 1974. Seismic moment, earthquake energy and seismic flow of mountain masses. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (1), 23—40 (in Russian).
- Mileev V. S., Rozanov S. B., Baraboshkin E. Yu., Shalimov I. V., 1998. Peculiarities of internal deformations of allochthons in the Mountainous Crimea. *Doklady Akademii nauk* 358 (2), 233—235 (in Russian).
- Muratov M. V. (ed.), 1969. Geology of the USSR. Vol. VIII. Crimea. Part 1. Geological description. Moscow: Nedra, 576 p. (in Russian).
- Murovskaya A. V., 2012. Stress fields and deformation modes of the Western Mountainous Crimea in the Alpine stage of tectogenesis according to tectonophysical data: *Dis. ... cand. geol. and min. sci.* Kiev, 146 p. (in Russian).
- Murovskaya A., Ippolit J.-C., Sheremet E., Yegorova T., Volfman Yu., Kolesnikova K., 2014. Deformational structures and stress fields of the south-western Crimea in the context of the evolution of Western Black Sea basin. *Geodynamika* (2), 53—68 (in Russian).
- Osokina D. N., Fridman V. N., 1987. Investigation of the laws of the structure of the stress field in the vicinity of a shear discontinuity with friction between the banks. In: *Fields of stresses and deformations in the Earth's crust*. Moscow: Nauka, P. 74—119 (in Russian).
- Patalaha E. I., Gonchar V. V., Senchenkov I. K., Chervinko O. P., 2003. Indenter mechanism in the geodynamics of the Crimean-Black Sea region. Kiev: Emko, 226 p. (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., 2017. Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2016. *Scientific notes of the Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology* 4 (4), 36—48 (in Russian).
- Rebetskiy Yu. L., 2007. Tectonic stresses and strength of mountain massifs. Moscow: Nauka, 406 p. (in Russian).

- Tugolesov D. A., Gorshkov A. S., Meysner L. B., Solovyev V. V., Khakhalev V. I., 1985. Tectonics of the Mesozoic-Cenozoic deposits of the Black Sea basin. Moscow: Nedra, 215 p. (in Russian).
- Yudin V. V., 2011. Geodynamics of the Crimea. Simferopol: Diaypi, 335 p. (in Russian).
- Bott M. H. P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.* (96), 109—117.
- Byerlee J. D., 1978. Friction of Rocks. *Pure Appl. Geophys.* 116, 615—626.
- Delvaux D., Sperner B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: *New insights into structural interpretation and modeling. Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 212, 75—100.
- Dinu C., Wong H. K., Tambrea D., Matenco L., 2005. Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophysics* 410 (1—4), 417—435. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.04.012>.
- Espurt N., Hippolyte J. C., Kaymakci N., Sangu E., 2014. Lithospheric structural control on inversion of the southern margin of the Black Sea Basin, Central Pontides, Turkey. *Lithosphere* 6 (1), 26—34. <http://doi.org/10.1130/L316.1>.
- Görür N., 1997. Cretaceous syn- to post-rift sedimentation on the southern continental margin of the Western Black Sea Basin. In: Robinson A. G. (ed.). *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region*. AAPG Memoir. 68, P. 227—240.
- Finetti I., Bricchi G., Del Ben A., Pipan M., Xuan Z., 1988. Geophysical study of the Black Sea. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* XXX (117-118), 197—324.
- Hippolyte J. C., Espurt N., Kaymakci N., Sangu E., Müller C., 2016. Cross-sectional anatomy and geodynamic evolution of the Central Pontide orogenic belt (northern Turkey). *Int. J. Earth Sci.* 105 (1), 81—106. doi: 10.1007/s00531-015-1170-6.
- Hippolyte J. C., Müller C., Kaymakci N., Sangu E., 2010. Dating of the Black Sea Basin: new nannoplankton ages from its inverted margin in the Central Pontides (Turkey). In: M. Sosson, N. Kaymakci, R. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (eds). *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform. Geol. Soc. London Spec. Publ.* 340, 113—136. <http://doi.org/10.1144/SP340.7>.
- Khriachtchevskaia O., Stovba S., Stephenson R., 2010. Cretaceous-Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (eds). *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform. Geol. Soc. London Spec. Publ.* 340, 137—157. doi: 10.1144/SP340.8.
- Munteanu I., Matenco L., Dinu C., Cloetingh S., 2011. Kinematics of back-arc inversion of the Western Black sea Basin. *Tectonics* 30, TC5004. doi: 10.1029/2011TC002865.
- Nikishin A. M., Okay A. I., Tüysüz O., Demirer A., Amelin N., Petrov E., 2015a. The Black Sea basins structure and history: new model based on new deep penetration regional seismic data. Part 1: Basins structure and fill. *Mar. Pet. Geol.* (59), 638—655. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.017>.
- Nikishin A. M., Okay A. I., Tüysüz O., Demirer A., Amelin N., Petrov E., 2015b. The Black Sea basins structure and history: new model based on new deep penetration regional seismic data. Part 2: Tectonic history and paleogeography. *Mar. Pet. Geol.* (59), 656—670. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.018>.
- Nikishin A. M., Wannier M., Alekseev A. S., Al-mendiger O. A., Fokin P. A., Gabdullin R. R., Khudoley A. K., Kopaeich L. F., Mityukov A. V., Petrov E. I., Rubtsova E. V., 2017. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: M. Sosson, R. Stephenson, Sh. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geol. Soc. London Spec. Publ.* 428, 241—264.
- Okay A. I., Nikishin A. M., 2015. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. *Int. Geol. Rev.* 57 (5—8), 1051—1076. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2015.1010609>.
- Popadyuk I. V., Stovba S. M., Khriachtchevskaia O. I., 2013. The New Geological map of

- the Crimea Mountains by SPK — Geoservice as a new approach to understanding the Black Sea Region. Abstracts of Darius Programme, Eastern Black Sea — Caucasus Workshop, 24—25 June, 2013, Tbilisi, Georgia, P. 48—50.
- Robinson A., Spadini G., Cloetingh S., Rudat J., 1995. Stratigraphic evolution of the Black Sea inferences from basin modelling. *Mar. Pet. Geol.* 12 (8), 821—835.
- Saintot A., Angelier J., Chorowicz J., 1999. Mechanical significance of structural patterns identified by remote sensing studies: a multiscale analysis of tectonic structures in Crimea. *Tectonophysics* 313 (1-2), 187—218. doi: 10.1016/S0040-1951(99)00196-1.
- Sheremet Y., Sosson M., Müller C., Gintov O., Murovskaya A., Yegorova T., 2016 a. Key problems of stratigraphy in the Eastern Crimea Peninsula: some insights from new dating and structural data. In: M. Sosson, R. Stephenson, Sh. Adamia (eds). *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 428, 265—305.
- Sheremet Y., Sosson M., Ratzov G., Sydorenko G., Voitsitskiy Z., Yegorova T., Gintov O., Murovskaya A., 2016 b. An offshore-onland transect across the north-eastern Black Sea basin (Crimean margin): Evidence of Paleocene to Pliocene two-stage compression. *Tectonophysics* 688, 84—100. doi: 10.1016/j.tecto.2016.09.015.
- Starostenko V. I., Sosson M., Farfulyak L., Gintov O. B., Yegorova T., Murovskaya A., Sheremet Ye., Legostaeva O., 2017. Deep crustal structure of the transition zone of the Scythian Plate and the East European Platform (DOBRE-5 profile): consequences of the Alpine tectonic evolution. *Геофизический журнал* 39 (4), 119—121.
- Vavrychuk V., 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophys. J. Int.* 199, 69—77. doi: 10.1093/gji/ggu224.
- Yegorova T., Gobarenko V., 2010. Structure of the Earth's crust and upper mantle of the West- and East-Black Sea Basins revealed from geophysical data and its tectonic implications. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (eds). *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 340, 23—42. doi: 10.1144/SP340.3.
- Zonenshain L. P., Le Pichon X., 1986. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic. *Tectonophysics* 123 (1), 181—211. doi: 10.1016/0040-1951(86)90197-6.

# On the critical mass of greenhouse gas

© **E. F. Klimchuk**, **V. F. Tarasov**, 2018

G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Received 1 October 2017

В останні роки змінення клімату Землі непокоїть громадськість світу. Зростання стихійних лих, раптові температурні коливання в окремих регіонах світу та інші відхилення клімату від традиційної поведінки кліматологи пов'язують з глобальним потеплінням. Наукова громадськість з кліматології розділилася щодо питання механізму природи потепління клімату Землі. Одні дослідники вважають, що з моменту початку промислової революції виробнича діяльність людства з кожним роком збільшує кількість вуглекислого газу у повітрі. Як встановлено, поряд з іншими газами він відповідає за парниковий ефект. У зв'язку з цим останнім часом відбулося кілька міжнародних конференцій, на яких ухвалено рішення про скорочення викидів вуглекислого газу в атмосферу.

Інша частина кліматологів, на підставі спостережень за активністю Сонця, вважає, що потепління спричинено проявом циклічного часового періоду цієї активності, і незабаром цей цикл закінчиться. Причому в подальшому можливе настання нового ледникового періоду. У статті запропоновано іншу можливу реальну причину потепління клімату. На засадах загальної теорії зворотного зв'язку показано, що чотири основні позитивні зворотні зв'язки, що викликають вторинну емісію водяної пари,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_4$  та зменшення альбедо, впливають на кліматичну систему Землі. Якщо на цей час рівень первинної антропогенної емісії парникових газів зростатиме, то загальна маса парникового газу внаслідок зазначених вище зворотних зв'язків досягне певної критичної величини, що зумовить самопосилення парникового ефекту, який спричинить біфуркаційний перехід кліматичної системи Землі у стан саморозігріву з необмеженим зростанням середньої температури земної поверхні.

**Ключові слова:** парниковий газ, позитивний зворотний зв'язок, підвищення температури, біфуркаційний перехід.

**Introduction.** Many systems have a critical parameter when a system passes from its original state into a qualitatively new state with new characteristics. In this paper we show that at a certain point or threshold when greenhouse gases reach a critical mass, the earth's climate system could change to a qualitatively new state with potentially catastrophic consequences for humankind and the nature. A key driver leading to such a state is a positive feedbacks upon the earth's climate system. There are several studies addressing the impact of such positive feedbacks on the greenhouse effect [Lashof et

al., 1997; Torn, Harte, 2006; Scheffer et al., 2006] but we argue that many researchers do not give sufficient attention to the strength and power of this impact. We argue further that it is such positive feedback that is the main cause of rapid climate change.

The theory of feedback states the following. A feedback works in a system only if this system is active. It means that the system is able to amplify any external action on it out of its self-energy. This condition is called the energy criterion [Raisbeck, 1954]. The earth's climate system satisfies this criterion. Therefore, all conclusions by the the-



ory of feedback can be used to research the influence of feedbacks on the earth's climate system.

To the possibility of these disastrous consequences have pointed out earlier [Klimchuk, Tarasov, 2005]. Now we want to return to this question making some additions.

**Analysis of feedback.** An active system of any kind with feedbacks is shown schematically in Fig.1, where 1 is active system itself, 2 is the feedback unit, 3 is the summing unit,  $U_1$  is the input action (signal),  $U_2$  is the response of the system to the input signal  $U_{in}$ ,  $U_{fu}$  is the response (signal) of the feedback, and  $U_{in}$  is the resulting action (signal) at the input of the system. The core of the feedback process is as follows. A part of the output response  $U_2$  of the system comes through the unit of feedback in the form of  $U_{fu}$  to the summing unit, where it is added to the input action  $U_1$ , forming the resulting input signal  $U_{in}$ . If the signs (phases) of signals  $U_1$  and  $U_{fu}$  coincide, the signal  $U_{in}$  and the response  $U_2$  increase accordingly to feedback. Otherwise a feedback is negative. The equality of signals  $U_1$  and  $U_{fu}$  means that the internal control or self-control is realized by the  $U_{fu}$  signal in systems with feedbacks. This is the essence of the principle of feedback.

The input action  $U_1$  and the response  $U_2$  of the system may have different physical nature. The signals  $U_1$  and  $U_{fu}$  are always similar. The latter is implemented, when necessary, by the appropriate transformation of the nature of  $U_2$  into a unit of feedback. Therefore, in considering the earth's climate system when the input action  $U_1$  is understood as the increase of anthropogenic emissions of greenhouse gases, we can speak of positive feedbacks only when there are such responses  $U_{fu}$  that represent increases of secondary emissions of greenhouse gases generated in the earth's climate system due primarily to anthropogenic emissions of greenhouse gases. These positive feedbacks are discussed below.

It is easy to show that the transmission factor (function)  $K_{fu}$  of the system with a feedback shown by the structural scheme

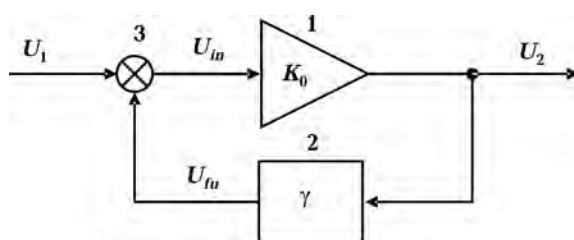


Fig. 1. Schematic structure of feedback.

in Fig. 1, is expressed by the following ratio [Bode, 1945]:

$$K_{fb} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K_0}{1 - \gamma K_0} = \frac{K_0}{1 - S} = \frac{K_0}{F}, \quad (1)$$

where  $K_0 = U_2/U_1$  is the transmission factor (function) of the system without a feedback,  $\gamma = U_{fu}/U_2$  is the transmission factor (function) of a unit of feedback,  $S = \gamma K_0$  is the loop amplification (reversion ratio) in the feedback loop in open position, and  $F$  is the recurrent difference.

In the ratio (1) it is assumed that the transmission functions of the summing unit 3 on signals  $U_1$  and  $U_{fu}$  are equal to unity. The function  $\gamma$  is otherwise called the feedback factor and in the case of a positive feedback is usually denoted by  $\alpha$  and in case of a negative feedback by  $\beta$ .

If the output of the unit of feedback 2 is disconnected from the adder 3 and the unit action is used at the input of system 1, the response at the output of the unit of feedback will be numerically equal to the loop gain  $S$ , which in case of multiloop feedbacks is usually called the reversion ratio. In research on the feedback theory the reversion ratio is usually denoted by  $T$ . We back out of this rule as in what follows we denote temperature by this letter.

In structural scheme in Fig. 1 for the open feedback loop:

$$S = \gamma K_0 = \frac{U_{fu}}{U_2} \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{fu}}{U_1}. \quad (2)$$

Taking into account that in case of a positive feedback the signs (phases) of signals  $U_1$  and  $U_{fu}$  coincide and for a negative fe-

edback they are different, in the former case  $S > 0$ , in the latter  $S < 0$ .

According to the value of  $S$  in case of a positive feedback, 3 modes of operations with such feedbacks are distinguished.

The first of them, which is called *subcritical*, is realized when  $0 < S < 1$ ,  $F < 1$ ,  $K_{fu} > > K_0$ ,  $S = 1$ ,  $F = 0$  correspond to the second mode called critical. This mode is also called the critical point or the point of bifurcation. In this mode the function  $K_{fu}$  has infinite break. Physically it means that the finite response  $U_2$  of the system is possible at the indefinitely small input action  $U_1$ . That is why its functioning is also possible without  $U_1$ . In fact, when  $S = 1$ , according to (2),  $U_{fu} = = U_1$ , which means that the feedback response is an exact copy of the input action. As a result, the system in a critical mode after dormancy breaking is able to continue its movement without the input action  $U_1$  because the input action will be replaced by the response  $U_{fu}$ , which is self-sustaining, being its own cause and effect. Consequently, when  $S = 1$ , qualitative changes occur in the system. It passes from the mode of external action into the mode of self-triggering (self-exciting oscillation mode) and its movement becomes free self-sustaining, that is, a self-movement. This self-movement is stationary and takes place at a constant speed defined by the initial conditions.

And at last the third mode, called *supercritical*, is realized when  $S > 1$ . Under this mode the systems with a positive feedback are in a state of dynamic instability, under which the differential equations describing such systems have divergent solutions. As in every cycle of self-triggering the signal  $U_{fu}$  increases by the factor of  $S > 1$ , after dormancy breaking the self-movement of such systems exponentially evolves to the point of their self-destruction or transition into some stationary state. The latter is possible only if at some value of the output response  $U_2$  the partial derivative  $S' = \partial S / \partial U_2$  becomes negative. As a consequence, as  $U_2$  increases further, the reversion ratio will fall to the value  $S = 1$  and the system will pass into a state of stationary self-movement with

the limiting value  $U_2 = U_c = \text{const}$ . If for some reasons  $U_2$  exceeds  $U_c$ , the reversion ratio will become subcritical ( $S < 1$ ). Self-triggering in the system will stop and as a result of self-braking the system will return to the stationary state  $U_2 = U_c$  with  $S = 1$ . If, on the contrary,  $U_2$  decreases, the reversion ratio will become supercritical ( $S > 1$ ). As a result of this, self-triggering will increase and the self-acceleration of the system will return to the stationary state again with  $S = 1$ . Therefore, at any deflections of  $U_2$  from  $U_c$  the system independently comes back to a stationary state. In equations of motion of such self-regulation systems these states correspond to limit stable cycles that are called attractors in mathematics. No matter how these cycles are reached, their realization is equivalent to the availability of internal self-regulation by means of negative feedbacks in the systems.

Examples of systems with or without attractor cycles are nuclear reactors and atomic bombs. The stationary mode of the former at the preset power levels is realized by the systems automatically controlling the critical value of the reversion ratio  $S = 1$ , which in this case is called the multiplication constant of secondary neutrons. There is no internal self-regulation in atomic bombs. That is why in atomic bombs if  $S > 1$ , the evolution of chain self-sustaining fission reactions tends towards unlimited growth, which leads to their self-destruction through explosion. The mass of the fissile material necessary for the bifurcation transition to the condition of the mentioned chain reaction to occur is called critical.

**Discussion.** Returning to the earth's climate system, we consider the increase of GhG emissions to be the input action for the earth's climate system, and the increase of mean temperature of the earth's surface to be the response. Then the function of the transmission of the climate system without taking into account its feedbacks can be described in the following way:

$$K_0 = \frac{\partial T_0}{\partial V_0}, \quad (3)$$

where  $\partial V_0$  is the increase of the primary GhG emission measured in carbon dioxide equivalent during the same time interval,  $\partial T_0$  is the increase of mean temperature induced by this emission and attributed to during the same time interval. By the primary GhG emission we understand the emission of carbon dioxide from human activities (anthropogenic emission).

Therefore, the time interval is not included explicitly in expression (3). As  $\text{CO}_2$  is an essential part of GhG emissions, it is reasonable to express both primary and secondary GhG emissions in their carbon dioxide equivalents.

In a previous work [Klimchuk, Tarasov, 2005] we singled out 4 main loops of a positive feedback in the earth's climate system. These 4 loops result from secondary GhG emissions caused by the increase of mean temperature due to primary GhG emissions.

We think the positive feedback loop, caused by the secondary emission of water vapor from open reservoirs, to be the first and most important for the following reasons. First, water vapor is the most active greenhouse gas, which absorbs all energy of the infrared spectrum (i. e. the heat) of the earth and prevents its flowing into space. The open reservoirs occupy more than 70 % of the earth's surface. Second, the primary annual water vapor emission amounts to nearly 600 billion tons, which is 1000 times as much as the summed annual natural and anthropogenic carbon dioxide emissions. Therefore, the rise of mean temperature caused by primary GhG emissions results in the increase of evaporation from open reservoirs, that is, in the secondary water vapor emission which in turn increases mean temperature due to the accumulation of atmospheric heat energy. In this way an appropriate positive feedback loop is created, which leads to the regenerative self-amplification of the greenhouse effect.

When the water temperature rise the solubility of gases in water falls. This results in the secondary emission from the world's oceans. The amount of  $\text{CO}_2$  dissolved in the world oceans is 55 times as much as the

amount of atmospheric  $\text{CO}_2$ . We believe that the emission of  $\text{CO}_2$  from the world's oceans is the second loop of a feedback in the earth's climate system.

However, recent experimental data have shown that such emissions are not only lacking but that the world's oceans absorbs about two thirds of anthropogenic  $\text{CO}_2$  emissions. It is for this reason that biologists have raised the alarm about the possibility of a substantial increase in oceanic acidity. Under present conditions the world's oceans are powerful inhibitors of the rate of anthropogenic global warming. However, it will be shown below that secondary  $\text{CO}_2$  emissions from the world's oceans do exist but appear in a very specific way.

We think the positive feedback loop caused by secondary  $\text{CH}_4$  emissions from the permafrost zones, where its storage in the form of gas-hydrates is enormous, to be the third. The third positive feedback loop is caused by secondary  $\text{CH}_4$  emission from the permafrost zones.

The fourth positive feedback loop results from the secondary decrease in the earth's reflectivity (albedo) due to continuing reduction in the area of ice and snow cover.

The decrease in the earth's reflectivity leads to the temperature rise of the earth's surface. It can be considered as a virtual emission of an equivalent value of  $\text{CO}_2$  which gives the same temperature rise as the albedo decrease does.

We consider the impact of other possible feedbacks on the earth's climate system as insignificant.

Before defining feedback factors for the four positive feedback loops it is necessary to return to the problem of  $\text{CO}_2$  absorption by the world's oceans. We will consider the records of ice core air bubbles obtained in ice coring at the Russian station Vostok in Antarctica, which generally agree with the data from a similar coring on the Concordia from the European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) program. In the article [Petit et al., 1999] provide graphs of time dependence for the surface air temperature of atmospheric  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  concent-

rations over 420.000 years. These graphs imply that the earth's climate is subject to cyclic changes of up to about 100.000 years per cycle. We agree with researchers who consider the relevant variation in the amount of solar radiation reaching the earth as the main cause of such cyclicity. Indeed, the solar cycles contributed to the rise of CO<sub>2</sub> concentration. But it does not prove that the amount of this concentration was defined only by the intensity of solar energy at that time.

The graphs show that at every increase in mean temperature, the atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations rise. We are sure that at the same time the water evaporation increased and the earth albedo decreased. Consequently, in the past the earth's climate was affected by the three (ignoring any anthropogenic emissions at that time) mentioned positive feedback loops leading to the regenerative self-amplification of the greenhouse effect. As a result, actual changes in mean temperature exceeded greatly its initial variations caused by changes in amounts of solar radiation merely. The main difference from today was that the primary influence on the earth's climate system were variations in solar radiation, the amplification of which led to increases in mean temperature, which turned the world's oceans into sources of secondary CO<sub>2</sub> emission. That is to say, when mean temperatures increased, the value of CO<sub>2</sub> equilibrium partial pressure or its saturation pressure increased, resulting in CO<sub>2</sub> emissions.

Today anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions are having a major impact on the climate system as a result of the partial pressure of CO<sub>2</sub> exceeding the equilibrium value corresponding to the present mean temperature, which has led to the world's oceans absorbing excess of CO<sub>2</sub> from the atmosphere. However, owing to the increase in mean temperature caused by anthropogenic GhG emissions, the equilibrium value of CO<sub>2</sub> partial pressure corresponding to mean temperature also continuously increases, which is decreasing the oceans' absorption of this gas. In this way a CO<sub>2</sub> positive feedback loop is created, with the secondary CO<sub>2</sub> emission be-

ing influenced by this decrease in absorption. Thus, the secondary CO<sub>2</sub> emission from the oceans occur. But they are smaller as some of CO<sub>2</sub> is absorbed by the world's oceans.

That is why by the increase in the primary GhG emission in (3) its effective value is understood which is equal to

$$\partial V_0 = \partial V'_0 - \partial V_{\text{car}}, \quad (4)$$

where  $\partial V'_0$  is the actual increase in the primary equivalent GhG emission at the fixed time interval,  $\partial V_{\text{car}}$  is the portion of CO<sub>2</sub> from the primary GhG emission absorbed by the World ocean at the same time interval.

Taking into account the above-mentioned, the feedback factors for the four considered positive feedback loops can be presented as follows:

$$\alpha_{\text{car}} = \frac{\partial V_{\text{car}}}{\partial T_0}, \quad \alpha_{\text{var}} = \frac{\partial V_{\text{var}}}{\partial T_0}, \quad \alpha_{\text{met}} = \frac{\partial V_{\text{met}}}{\partial T_0},$$

$$\alpha_{\text{al}} = \frac{\partial V_{\text{al}}}{\partial T_0}, \quad (5)$$

where  $\partial V_{\text{car}}$ ,  $\partial V_{\text{var}}$ ,  $\partial V_{\text{met}}$ ,  $\partial V_{\text{al}}$  are the secondary equivalent emissions caused by the primary increase in mean temperature  $\partial T_0$  and resulting from the secondary emission CO<sub>2</sub>, of water vapor, CH<sub>4</sub>, and the albedo decrease respectively.

The correctness of the factor  $\alpha_{\text{car}}$  is determined by the fact that the absorption of CO<sub>2</sub> by the World Ocean is allowed for by (4).

Based on this and taking into account (2) and (3) the positive feedback factor  $\alpha_{\text{gh}}$  and the reversion ratio  $S_{\text{gh}}$  of the greenhouse effect are defined as:

$$\alpha_{\text{gh}} = \alpha_{\text{car}} + \alpha_{\text{var}} + \alpha_{\text{met}} + \alpha_{\text{al}},$$

$$S_{\text{gh}} = \frac{\partial V_{\Sigma}}{\partial V_0}, \quad (6)$$

where  $\partial V_{\Sigma}$  is the increase of the summed equivalent secondary GhG emission.

From (6) it follows that the reversion ratio  $S_{\text{gh}}$  can be called the factor of secondary GhG emission.

Based on (1) the transmission function of the climate system subject to the possible

regenerative self-amplification of the greenhouse gas emission becomes:

$$K_{gh} = \frac{\partial T_{gh}}{\partial V_0} = \frac{K_0}{1 - \alpha_{gh} K_0} = \frac{K_0}{1 - S_{gh}} = \frac{K_0}{F_{gh}}, \quad (7)$$

where  $\partial T_{gh}$  is the actual increase in mean temperature subject to the positive feedback influence caused by the increase  $\partial V_0$  in the primary effective GhG emission,  $F_{gh}$  is the recurrent difference of the greenhouse effect.

Taking into account (3), the connection between the primary increase and the actual one in mean temperature in the presence of the regenerative self-amplification of the greenhouse effect is expressed as follows:

$$\frac{\partial T_{gh}}{\partial V_0} = \frac{\partial T_0}{\partial V_0 F_{gh}}, \quad \partial T_{gh} = \frac{\partial T_0}{F_{gh}}, \quad F_{gh} = \frac{\partial T_0}{\partial T_{gh}}. \quad (8)$$

**Conclusion.** Based on the reasoning above we come to the following conclusion. The observed rapid rise of the earth's mean temperature is caused by two factors. The first is the increase of the solar activity [Schaller et al., 2014]. It increases the mean temperature of the earth. But this temperature rise leads to the emission of greenhouse gases from the permafrost zones, increases water evaporation and decreases the albedo. To all this is added the greenhouse gas from man's productive activity. We consider them the primary greenhouse gases. Therefore, the Sun and man's activity caused the appearance of primary gases. These gases account for the second part of the mean temperature rise due to self-triggering of the earth's climate system owing to positive feedbacks. This part of the temperature rise is the second factor of the observed general temperature rise.

Indeed, from (8) it follows that if now  $S_{gh} > 0$ ,  $F_{gh} < 1$ , then  $\partial T_{gh} > \partial T_0$ . According to (6), the latter is possible provided the summed secondary GhG emissions are commensurable with the effective value of the primary GhG emissions. The calculations in [Torn, Harte, 2006; Scheffer et al., 2006] suggest such a possibility, making the situation dangerous. We think that positive feedback gives rise to a danger more serious than its impact of the earth's temperature only.

Increase in secondary GhG emissions caused by the same primary increase in mean temperature continues to occur as the absolute value of the latter becomes larger. From the graphs in [Petit et al., 1999] it follows that over the latest periods of global warming (in accordance with graphs) the concentration of atmospheric  $CO_2$  has not exceeded 0.03 % but now  $CO_2$  has 0.038 % and continues to rise rapidly. Furthermore, the earth is close to "the zero mark" of a regular period of global warming resulting from the earth's increased absorption of solar power. Consequently, mean temperature can only continue to rise in the future. At this shows of date facts of global warming (IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change). That is why it is inevitable in the coming decades when the summed secondary GhG emission equalizes the primary GhG emission, i. e., the factor of the secondary greenhouse gas emission equals amounts to the critical value  $S_{gh} = 1$ . The further increase of this factor will lead to the bifurcation transition of the earth's climate system in which self-triggering of the secondary GhG emissions results in a state of self-heating with the tendency for mean temperature to rise indefinitely. This process can enter a stationary state only after the complete evaporation of the earth's entire water surface. In such a case, the pressure on the earth's surface will reach 300 atm and the temperature will exceed 500 °C. The total mass of atmospheric GhG with which the mentioned bifurcation will take place we call *critical*. The potentialities of the greenhouse effect are clearly demonstrated by planet Venus.

Due to the supercritical carbon-dioxide atmosphere of this planet, the surface temperature of Venus is between 430—470 °C with the pressure on the planet's surface at 100 atm.

It is accounted for by the fact that in this case the available zones of heat and cold will exhibit their persistence under gradual temperature rise. As a result, some parts of the earth experience rain showers (dumping of accumulated water vapor) while others experience equalizes hurricanes and tornadoes as a result of thermodynamic disequilibrium.

Every new emission of a primary (anthropogenic) GhG causes the growth (or concentration) of the GhG shielding layer which will reduce the amount of the earth's heat radiation escaping into space. This reduction will occur exponentially with the emission of every new primary GhG portion as the intensity of any radiation going through the shielding layer falls exponentially, that is,

the earth's capacity to shield heat improves. It means that value  $K_0 = \partial T_0 / \partial V_0$ , in (3) and (7) is the increasing time function, which increases the danger of the early occurrence of this state.

*The conclusion to be drawn from this discussion is the view of some climatologists that the future temperature rise in the earth's atmosphere poses no risk to be dangerous. It causes our anxiety.*

Taking into account investigations about impact at climate positive feedback are continuing [Plattner et al., 2009; MacDougall et al., 2015; MacDougall, Knutti, 2016; Rugenstein et al., 2016] we propose that researchers calculate estimates of the time dependence  $\partial F_{gh} / \partial t$  i. e., the rate of approach to the self-heating bifurcation and estimate the likely time necessary for the transition to this state under the condition of future growth of the increase in the primary GhG emission.

## On the critical mass of greenhouse gas

© **E. F. Klimchuk, V. F. Tarasov, 2018**

In recent years, changes in the Earth's climate have raised concern all around the globe. Climatologists have been drawing connections between global warming and a growing number of natural disasters, unexpected temperature fluctuations in some regions of the world and a number of other climatic aberrations. Within the scientific community, the opinions as to the nature and mechanism of the Earth's climate change have split. Some contend that since the beginning of the industrial revolution, the carbon dioxide levels in the air have been steadily rising due to human production activities. Along with other gases, carbon dioxide has been inculcated for the greenhouse effect. In connection with this, a number of recent international conferences have adopted resolutions to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere. Another group of climatologists bases its findings on observations of solar activity, arguing that global warming is caused by a recurring spike in solar activity, with the current increase due to end soon, potentially giving way to a new ice age down the road. In the following work, we put forth yet another hypothesis regarding global warming. The influence of four main positive feedback loops caused by the secondary emission of water vapor, CO<sub>2</sub>, CO<sub>4</sub>, and decreased albedo on the earth's climate system is shown on the basis of the general theory of feedback. If the present level of primary anthropogenic emissions of greenhouse gas (GhG) keeps, the total mass of atmospheric greenhouse gas can run up to such a critical value that the mentioned feedbacks, which give rise to self-amplification of the greenhouse effect, can cause the bifurcation transition of the climate system to the state of self-heating tending to the unlimited rise of mean temperature of the earth's surface.

**Key words:** greenhouse gas, positive feedback, temperature rise, bifurcation transition.

## References

- Bode H. W., 1945. Network analysis and feedback amplifier design. New York: D. Van Nostrand Co.
- Klimchuk E. F., Tarasov V. F., 2005. On one model of a greenhouse effect. *Geofizicheskiy zhurnal* 27(5), 906—910 (in Russian).
- Lashof D. A., DeAngelo B. J., Saleska S. R., Harte J., 1997. Terrestrial Ecosystem Feedbacks to global climate change. *Annu. Rev. Energy. Environ.* 22, 75—118.
- MacDougall A. H., Knutti R., 2016. Enhancement of non-CO<sub>2</sub> radiative forcing via intensified carbon cycle feedbacks. *Geophys. Res. Lett.* 43, 5833—5840. doi: 10.1002/2016GL068964.
- MacDougall A. H., Zickfeld K., Knutti R., Matthews H. D., 2015. Sensitivity of carbon budgets to permafrost carbon feedbacks, non-CO<sub>2</sub> forcings, and negative emissions. *Environ. Res. Lett.* 10(12). doi: 10.1088/1748-9326/10/12/125003.
- Petit J.-R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V. M., Legrand M., Lipenkov V., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core Antarctica. *Nature* 399, 429—436. doi:10.1038/20859.
- Plattner R., Knutti R., Friedlingstein P., 2009. Irreversible climate change due to carbon-dioxide emissions. *Proc. of the National Academy of Sciences* 106, 1704—1709. doi: 10.1073/pnas.0812721106.
- Raisbeck G., 1954. A definition of passive linear networks in terms of time and energy. *J. Appl. Phys.* 25, 1510—1514.
- Rugenstein M. A. A., Caldeira K., Knutti R., 2016. Dependence of global radiative feedbacks on evolving patterns of surface heat fluxes. *Geophys. Res. Lett.* 43, 9877—9885. doi: 10.1002/2016GL070907.
- Schaller N., Sedláček J., Knutti R., 2014. The asymmetry of the climate system's response to solar forcing changes and its implications for geoengineering scenarios. *J. Geophys. Res.* 119, 5171—5184. doi: 10.1002/2013JD021258.
- Scheffer M., Brovkin V., Cox P., 2006. Positive feedback between global warming and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration inferred from past climate change. *Geophys. Res. Lett.* 33, L10702. doi: 10.1029/2005GL025044.
- Torn M. S., Harte J., 2006. Missing feedbacks, asymmetric uncertainties, and the underestimation of future warming. *Geophys. Res. Lett.* 33, L10703. doi:10.1029/2005GLO25540.

## Модели несоосного деформирования в структурном анализе складчатости Украинских Карпат

© В. В. Гончар, 2018

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины,  
Киев, Украина

Поступила 15 ноября 2017 г.

Виконано структурний аналіз і реконструкцію складчатості Українських (флішових) Карпат за матеріалами (розрізами) середньомасштабних геологічних знімачів. Застосовано методичні розробки в рамках теорії вигину і неспіввісності течії. За допомогою моделювання асиметричної складчатості показано, що ефективним методом діагностики є повернення складок у проміжний деформований стан за допомогою зняття неспіввісності течії і статистичного пошуку найімовірнішого орієнтування осі стиснення. Визначено умови виникнення карпатських структур, які можуть бути наслідком як поздовжньо-поперечного вигину, так і горизонтальної неспіввісності течії, накладеної на початково симетричний або асиметричний вигин складок. У рамках моделей неспіввісності деформування встановлено нахил осі стиснення й інтенсивність деформування, що привело в підсумку до спостережуваних складчастих форм, показано специфікацію складок із різних структурно-фаціальних зон Карпат за ступенем стислості та асиметрії, наведено їх генетичне тлумачення.

**Ключові слова:** Українські Карпати, складчастість, поздовжньо-поперечний вигин, неспіввісність течії, моделювання, реконструкція.

**Введение.** Надежно установленный (к концу 80-х годов прошлого века) общий чешуйчато-надвиговый стиль тектонического строения Украинских (флишевых) Карпат (УК) [Тектоника Украины, 1988] позволил в дальнейшем сосредоточиться на разработке моделей аккреционного тектогенеза [Паталаха и др., 1995; Гнилко, 2011; Гончар, 2012]. Предлагаемая статья, как к обратной стороне медали, обращена к проблеме складчатости УК, т. е. установлению связей между моноклиальной чешуйчатой структурой и внутренним деформационным строением отдельных зон, основную ткань которых составляют асимметричные складки. Возникающие при этом задачи тесно переплете-

ны с практикой палинспастических реконструкций УК [Паталаха и др., 2003; Накапелюх, Бубняк, 2013; Бубняк та ін., 2014; Гинтов и др., 2014]. Попытаемся обосновать механизмы, приведшие к формированию наблюдаемой складчатой структуры вдоль некоторых пересечений, используя для анализа методические разработки в рамках теорий продольно-поперечного изгиба и несоосного течения, ранее развивавшиеся как самостоятельные [Гончар, 2001, 2008]. Так как реконструкции, основанные на складчатой структуре, дают возможность использовать складки как тензодатчики [Паталаха и др., 1974], параллельно будут определяться тензорные характеристики деформации. С учетом



внешне однообразного стиля строения УК внимание уделяется также выработке приемов формально-классификационного изучения складчатых структур.

**Асимметричные складки, их моделирование и реконструкция в рамках теорий изгиба и несоосного течения.** Симметричные и асимметричные складки разделяются согласно ориентировке осевой поверхности относительно горизонтали [Ажгирей, 1966; Никола, 1992]: симметричными называются складки с вертикальной осевой поверхностью, одинаковыми наклоном и длиной крыльев; соответственно асимметричные складки обладают наклонной осевой поверхностью и разными наклоном и длиной крыльев. Следует добавить, что асимметричные складки, как правило, имеют разную мощность вдоль оси и на крыльях, вторично приобретенную в ходе пластического течения. Согласно предпосылкам механики деформируемых тел [Теркот, Шуберт, 1985], симметричные вертикальные складки следует рассматривать как результат горизонтального (продольного) сжатия горизонтально же залегающих слоев. В противоположность этому механизм образования асимметричной складчатости из исходно горизонтальных слоев логично объяснять более общим состоянием несоосности слоя и действующей сжимающей силы.

Первоначально теоретические основы и методика использования складок как тензодатчиков деформированной толщи разработаны Е. И. Паталахой, А. В. Смирновым и А. И. Поляковым [Паталаха и др., 1974]. В качестве механизма складкообразования ими была взята за основу обстановка продольного сжатия компетентного слоя, когда за его упругим изгибом следовало пластическое деформирование (течение). Складки, испытавшие такое течение, приобретают увеличенную мощность в замках и относительно уменьшенную на крыльях. Были установлены зависимости между сжатостью складок, изменениями мощности, с одной стороны, и тензором деформации, с другой. С их помощью по структурным признакам мож-

но определять величины деформации, выделяя их упругую и пластическую составляющие. Остаются ли верными эти соотношения и для складок, чья форма отклоняется от свойств симметрии? И другой вопрос: какую методику следует применить в случае асимметричных складок, если построения в рамках симметричного приближения не действуют? Ответы будем искать, начав с моделирования.

Складки продольно-поперечного изгиба. Численно можно показать [Гончар, 2008], что асимметричные складки, наблюдаемые в пределах складчатых поясов и краевых прогибов, могут быть следствием упругого изгиба в условиях взбросо-надвиговых перемещений, когда изгиб развивается в обстановке наклонных относительно слоя сжимающих сил — так называемый продольно-поперечный изгиб [Попов, 1986]. Для расчета изгибных кривых применяется метод эллиптических интегралов. В его рамках уравнения координат точек изгибаемой упругой полоски имеют вид [Попов, 1986]

$$\frac{x'}{l} = \frac{2(E(\varphi) - E(\varphi_0))}{b} - \frac{s}{l}, \quad (1)$$

$$\frac{y'}{l} = \frac{2k(\cos \varphi_0 - \cos \varphi)}{b}, \quad (2)$$

где  $F(\varphi)$ ,  $E(\varphi)$  — эллиптические интегралы первого и второго рода,  $s = \frac{F(\varphi) - F(\varphi_0)}{b}$  — расстояние вдоль кривой  $l$ ,  $b = 3F(\varphi_1) - F(\varphi_0)$  — силовой коэффициент ( $\varphi_0, \varphi_1$  — значения эллиптической амплитуды в начальной и конечной точках),  $k = \sin \alpha$  — модуль эллиптического интеграла, определяемый угловым параметром  $\alpha$  (рис. 1, а). Сжатие складки определяется отношением базы ( $bs$ ) к длине изгибаемого слоя  $l$ :

$$d_b = \frac{bs}{l} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \theta)}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\theta$  — углы наклона зоны сдвига и базы соответственно.

Складки с разной степенью асимметрии — от открытых флексур до близких к симметричным — обладают характерной для изгибных форм неизменной мощностью слоя. В модели степень асимметрии зависит от наклона плоскости гипотетического разлома, на которую "опирается" изгибаемый слой [Гончар, 2008]. В поле диаграммы, описывающей серии складок, можно представить два крайних случая их развития: при стабильном наклоне разлома и ориентированной изгибающей силе (рис. 1, б). В первом варианте наклон сжимающей силы увеличивается от субгоризонтального и эволюция складки прослеживается от начальных

слабодеформированных и квазисимметричных форм к все более асимметричным и сжатым. Напротив, если зафиксировать наклон вектора силы, то сначала формируются сильно асимметричные флексуроподобные складки, эволюционирующие по мере нарастания деформации к слабо асимметричным сжатым формам. Наклон виртуального разлома при этом изменяется от крутого до пологого, близкого к нулевому. Дальнейшая эволюция асимметричных складок связана с переходом от упругого изгибного деформирования к пластическому течению, когда мощность слоя изменяется в замке и на крыльях в соответствии с ориентировкой оси главного нормального напряжения на границе объема, вследствие чего складка из категории концентрической переходит в категорию подобной.

Проблем реконструкции при рассмотрении асимметричных изгибных складок не возникает, если ставится задача определения степени горизонтального сокращения и связанных со складчатостью надвиговых перемещений. Тогда может использоваться выравнивание слоя до горизонтального состояния. Также может применяться диаграмма, связывающая параметры упругого изгиба и сжатия складки (см. рис. 1, б). Основные трудности обусловлены расшифровкой наложенной пластической деформации. В случае симметричной вертикальной складчатости задача облегчается соосностью тензоров напряжений и деформаций (отсутствием вращательной деформации в объеме), так что проследить связь между пластической деформацией и формой складки можно аналитическими методами [Паталаха и др., 1974]. Что касается асимметричных структур с признаками пластического течения, то здесь реконструкция подразумевает использование величин не только сжатия, но и угла вращения (сдвига) в объеме.

Можно существенно облегчить задачу, если априорно конкретизировать обстановку пластического течения, исходя из разумных допущений. В складчатых поясах, где не действуют высокие темпера-

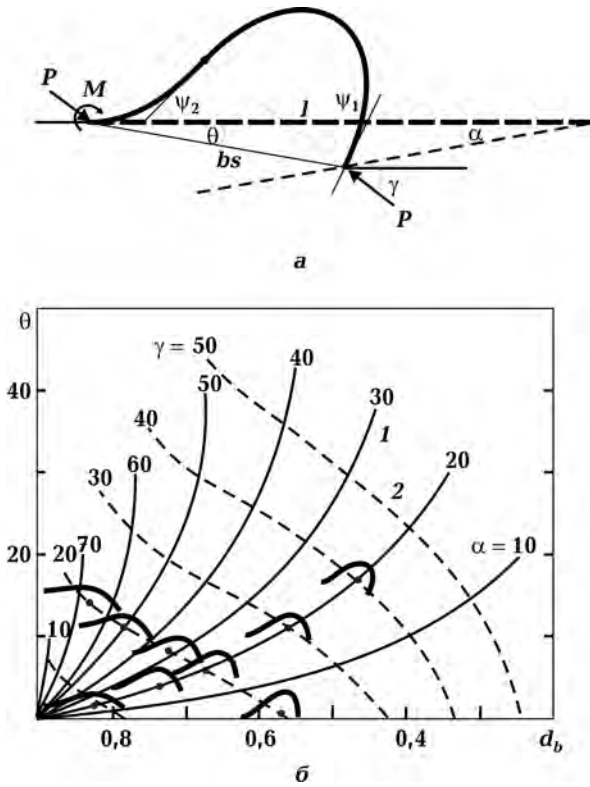


Рис. 1. Модель складчатости продольно-поперечного изгиба: а — расчетная схема продольно-поперечного изгиба тонкого стержня [Попов, 1986]; стрелками показано направление сжимающей силы  $P$  на концах стержня,  $M$  — момент на закрепленном конце (см. пояснения в тексте); б — базовая диаграмма, связывающая продольно-поперечный изгиб с углами наклона надвиговой зоны ( $\alpha$ ) и сжимающей силы ( $\gamma$ ) в координатах сжатия складки ( $d_b$ ) и углов наклона базы ( $\theta$ ) [Гончар, 2008]. Показаны изгибные формы для  $\alpha = 20^\circ$  и  $\gamma = 20^\circ$ ; 1—2 — траектории складок с постоянными величинами  $\alpha$  и  $\gamma$ .

туры и давления (приповерхностные условия), течение развивается наиболее упорядоченно [Паталаха, 1985] (за исключением подводно-оползневых движений, явлений диапиризма и меланжа). Наличие субгоризонтальных границ различной природы: напластование пород, поверхность фундамента осадочной толщи, реологические границы, связанные с вертикальными температурными градиентами, с одной стороны, с другой — примат горизонтальных движений при орогенезе складчатых поясов, все это благоприятствует условию развития обстановки общего несоосного течения с (суб)горизонтальными границами [Гончар, 2001; Паталаха и др., 2003].

Развитие асимметричной складчатости в обстановке общего несоосного течения и методика реконструкции. Общее несоосное течение означает совмещение обстановок простого и чистого сдвигов (рис. 2, а). В его процессе происходит прогрессивное вращение эллипсоида деформации, так что главные оси тензоров конечной деформации и напряжений не совпадают. Применение модели несоосного течения базируется на соотношениях, связывающих параметры тензоров конечной деформации, скорости деформации и напряжений [McKenzie, 1979; Weijermars, Poliakov, 1993; Гончар, 2001]. Основное предназначение метода, использующего модель несоосного течения, — определение составляющих тензора деформации и восстановление, таким образом, характеристик обстановки, связанной с условиями пластичного деформирования, а также создание количественной базы для палинспастических реконструкций [Паталаха и др., 2003]. Одна из возможностей данного подхода — реконструкция положения осей тензора напряжений, действовавшего на вязкопластическом этапе деформирования.

Приведем еще раз основные соотношения для тензора конечной деформации при горизонтальном несоосном течении:

$$F = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} \\ 0 & f_{22} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

$$f_{11} = e^{\dot{\epsilon}t \cos \beta}, \quad (4a)$$

$$f_{12} = 2\dot{\epsilon}t \sin 2\beta, \quad (4б)$$

$$f_{22} = f_{11}^{-1},$$

где  $f_{11}$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{22}$  — горизонтальные нормальная и сдвиговая, вертикальная нормальная составляющие тензора деформации,  $\dot{\epsilon}$  — скорость деформации,  $t$  — время,  $\beta$  — угол наклона оси сжатия тензора напряжений. Горизонтальная составляющая  $f_{11}$  определяет величину горизонтального сокращения  $d_f$  первоначального объекта (складки) на этапе течения.

Угол сдвига (скашивания первоначально вертикальной линии) определяется из произведения нормальной и сдвиговой составляющих тензора

$$sh = \text{arc tg} ( f_{11} \cdot f_{12} ). \quad (5)$$

Деформация удлинения эллипса равна

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{R - \sqrt{R^2 - 4}}}, \quad (6)$$

где  $R = d^2 + d^{-2} + \text{tg}^2(\delta)$ ,  $\delta = \text{arc tg}(f_{12})$ ,  $\delta$  — угловой параметр (чистое вращение, не путать с (5)).

Наложение деформации несоосного горизонтального течения на симметричную изгибную складку переводит ее в несимметричную. На рис. 2, б, I и II показан результат несоосного деформирования двух симметричных складок  $s_1$  и  $s_2$  с разной степенью сжатия при  $\beta = 25^\circ$ ,  $\dot{\epsilon} = 0,315$  млн лет<sup>-1</sup> и  $t = 4$  млн лет. В результате течения первоначально вертикальная ось складок приобретает наклон (практически совпадающий с наклоном оси эллипса конечной деформации), крылья теряют соразмерность — подвернутое крыло становится короче; мощность слоя увеличивается в замке, в пределах короткого крыла она становится больше, чем у длинного. Неизменно горизонтальной остается база складки — линия, соединяющая крылья в точках перегиба. В отличие от них база асимметричной изгибной склад-

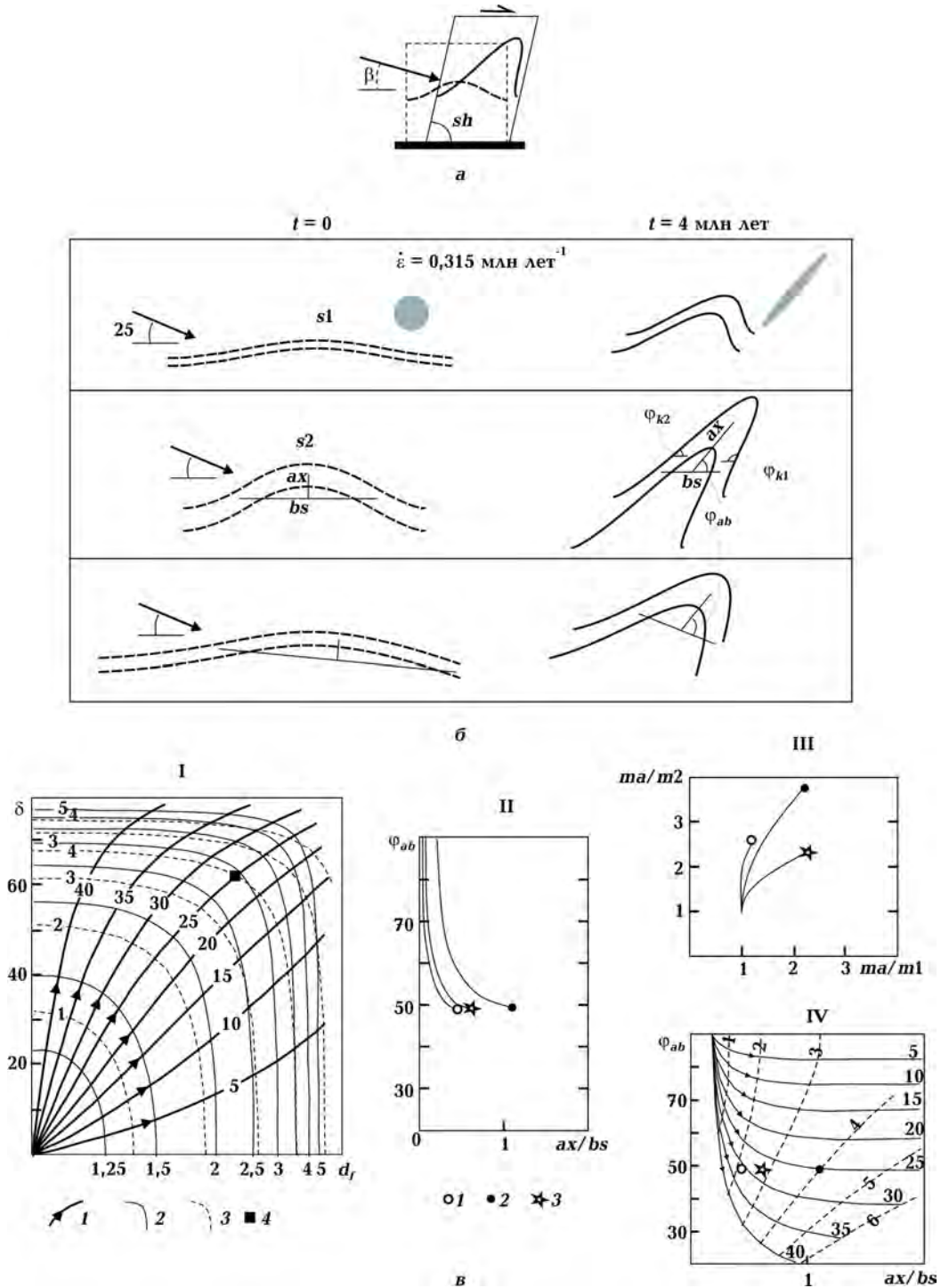


Рис. 2. Модели развития асимметричной складчатости в условиях горизонтального несоосного течения: *a* — схема горизонтального несоосного течения [Гончар, 2001];  $\beta$  — угол наклона оси сжатия,  $sh$  — угол сдвига; *b* — результат наложения деформации несоосного течения на изгибные симметричные ( $s_1$  и  $s_2$ ) и асимметричную складки; угол наклона оси сжатия  $25^\circ$ , скорость деформации  $0,315 \text{ млн лет}^{-1}$ , время 4 млн лет,  $bs$  и  $ax$  — база и осевая высота складки,  $\varphi_{k1}$  и  $\varphi_{k2}$  — углы наклона крыльев; *в* — диаграммы, описывающие эволюцию складок в условиях несоосного течения (I — диаграмма несоосного течения; 1 — траектории движения деформируемого объема с постоянным углом  $\beta$ , 2 — величины сжатия эллипса, 3 — изохроны (млн лет), 4 — точка деформированных складок; II—III — классификационные диаграммы, описывающие эволюцию складки в координатах сжатости — угла между осью и базой (II), относительных мощностей (III); 1—3 — точки складок (исходно симметричных  $s_1$  и  $s_2$ , асимметричной (3)); IV — классификационно-генетическая диаграмма, на которую вынесены траектории складки  $s_2$  при различных режимах несоосного течения — углах  $\beta = 5 + 40^\circ$ ; штриховые кривые — изохроны (млн лет).

ки обладает наклоном изначально (рис. 2, б, III), который усиливается в процессе течения, ее осевая линия также вытягивается в направлении оси максимального удлинения тензора конечной деформации. Графическая эволюция складок показана на рис. 2, в. Единой траектории в поле несоосной деформации (рис. 2, в, I) соответствуют индивидуальные тренды каждой складки на диаграммах, описывающих изменения наклона оси, сжатости, относительных мощностей (рис. 2, в, II и III). Из представленного видно, что для разных складок, развивающихся в одинаковых условиях несоосного деформирования, требуется отдельное описание. Поэтому обратная задача восстановления истории деформирования не может быть решена аналитически по наблюдаемым формам.

Чтобы осуществить реконструкцию, необходимо знать параметры несоосной деформации, как минимум — угол наклона оси сжатия. В настоящей статье был применен численный поиск наиболее вероятной величины  $\beta$  для наблюдаемых складчатых форм на основе минимизации функции, суммирующей отклонения трех основных параметров складки от идеального состояния изгибной складки:

$$Sum = S1 + S2 + S3, \quad (7)$$

где  $S1 = 1 - (m_{os}/m_{k1})$  — отклонение от единицы отношения осевой мощности к мощности первого крыла;  $S2 = 1 - (m_{os}/m_{k2})$  — то же для второго крыла;  $S3 = 90^\circ - \varphi_{ob}$  — отклонение угла между осью и базой от  $90^\circ$ . Использовался принцип возвращения структур в недеформированное состояние с перебором спектра возможных ориентировок оси максимального сжатия в обстановке, обратной обстановке соскладчатого деформирования (рис. 3, а). Результат подтверждает получение на основе минимума  $Sum$  однозначного решения (рис. 3, б) — наклона оси сжатия, равного  $25^\circ$ . Далее перебором времен определяется также условная длительность деформирования (при заданной  $\dot{\epsilon} = 0,315$  млн лет $^{-1}$ ). После этого по уравнениям (4)—(6) нахо-

дят все параметры несоосной деформации.

Для приблизительной оценки  $\beta$  одновременно со структурной классификацией природных складок можно использовать диаграмму несоосной деформации одной модельной складки, например умеренно изогнутой симметричной  $s2$  (рис. 2, в, IV). Если вынести на нее фигуративные точки двух других складок, они дадут неправильную информацию о величине  $\beta$ . Однако отклонения от реального значения невелики. В случае природных данных такие отклонения часто могут находиться в границах погрешности измерения. Поэтому для ориентировочной оценки наклона оси сжатия при анализе складок применение общей классификационно-генетической диаграммы вполне оправдано, что будет подтверждено далее на примере складок Карпат.

Важный, но промежуточный результат определения обстановки несоосного деформирования приводит к исходной форме складки упругого изгиба — симметричной либо асимметричной, которую, если

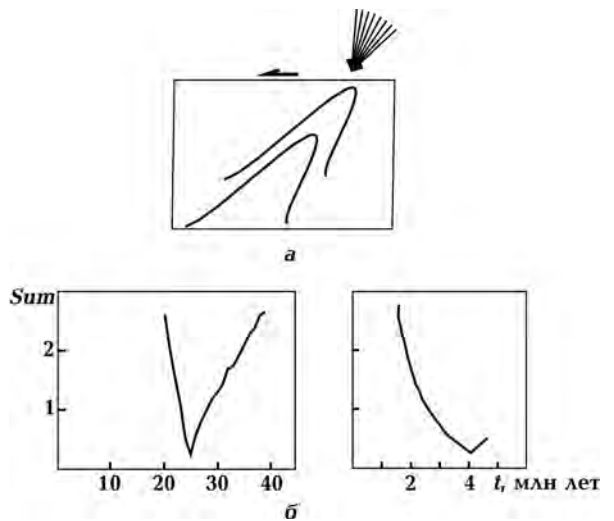


Рис. 3. Пример реконструкции модельной асимметричной складки  $s2$  в обстановке несоосного горизонтального течения: а — возвращение в недеформированное состояние с перебором спектра ориентировок оси сжатия в обстановке с обратным направлением сдвига, б — расчет суммарной функции для ориентировок оси сжатия и длительности деформирования (при  $\dot{\epsilon} = 0,315$  млн лет $^{-1}$ ). См. пояснения в тексте.

требуется восстановить первоначальную длину пласта, следует выпрямить. Эта процедура может быть выполнена графически или с помощью несложной компьютерной программы. После этого определяется величина горизонтального сжатия, соответствующая изгибу. Общее горизонтальное сжатие, выраженное в кратных величинах для этапов изгибного деформирования и несоосного течения, определяется произведением этих двух величин:

$$D = d_b \cdot d_f. \quad (8)$$

**Анализ и реконструкция карпатской складчатости.** Рассматриваемые геологические разрезы сосредоточены по территории УК и представляют разные тектонические зоны: Дуклянскую, Кросно, Скибовую и Бориславско-Покутскую (рис. 4). Тем не менее стиль складчатой тектоники у них один и тот же: в разной степени асимметричные складки — антиклинали, опирающиеся коротким, подвернутым крылом на разлом, либо группирующиеся в пакеты наклонные или опрокинутые антиклинали и синклинали. Задача анализа состоит из двух частей: во-первых, формальная характеристика складок из различных зон по структурным особенностям, во-вторых, генетическое толкование отдельных складок и выделенных групп. С этой целью были составлены две классификационные диаграммы, фиксирующие соотношение основных параметров: угол наклона крыльев — первая диаграмма, угла наклона оси и сжатости складки — вторая (рис. 5, а). Генетический элемент вводился нанесением в поле диаграмм траекторий эволюции модельной симметричной складки  $s_2$  в обстановке несоосного течения при разных углах наклона оси сжатия (см. рис. 2, б и в). Анализируемые складки, с которых брали замеры, пронумерованы на разрезах (см. рис. 4).

С помощью классификационных диаграмм удастся раскрыть внешне однообразный стиль строения СФЗ УК: складки, отобранные из разных разрезов, дискриминируются как на основе замеров углов наклона крыльев, так и соотноше-

ний углов наклона оси и сжатости. Получается также предварительная оценка условий несоосной деформации для разных складок и их групп (углов  $\beta$ ), которую затем можно будет сравнивать с данными численной реконструкции. Отметим сразу тенденцию к группированию складок из разных тектонических зон по стилю и условиям несоосного деформирования. Складки Дуклянской зоны (№ 1—4), обладающие наибольшей степенью асимметрии (подвернутые короткие крылья и оси с наибольшими углами наклона), группируются в краевой зоне обеих диаграмм, отмеченной соответственно траекториями с большими наклонами оси сжатия ( $\beta = 30 \div 35^\circ$ ), что соответствует обстановке деформирования с большей вращательной компонентой. Складки тыловой части Кросно (№ 5—7) обладают противоположной тенденцией — они близки к симметричным и занимают пространства с пологими наклонами оси сжатия (менее  $15^\circ$ ). Складки Кросно на профиле 4, занимающие пространство в ее фронтальной части вблизи Скибовой зоны (№ 9—14), наименее деформированы и вытянуты в начальной части диаграмм вдоль траекторий слабо- и средненаклоненной оси сжатия ( $\beta = 10 \div 24^\circ$ ). На их продолжении находятся точки складок 15—20, принадлежащих Скибовой и Бориславско-Покутской зонам в юго-восточной части УК, охватывая примерно тот же интервал значений  $\beta = 14 \div 24^\circ$ . Здесь можно говорить об однотипности условий деформирования для двух последних профилей, при том, что складки последней группы сильнее деформированы. Последнее соответствует общей тектонической ситуации: юго-восточная (Раховско-Буковинская) область УК сужена (по-видимому, за счет большего горизонтального сжатия) по сравнению с основной территорией примерно в 1,5—2 раза.

Таким образом, обе рассмотренные диаграммы могут служить основой для формальной классификации асимметричных складок, выделения их групп, а также условий деформирования. Более точное оп-

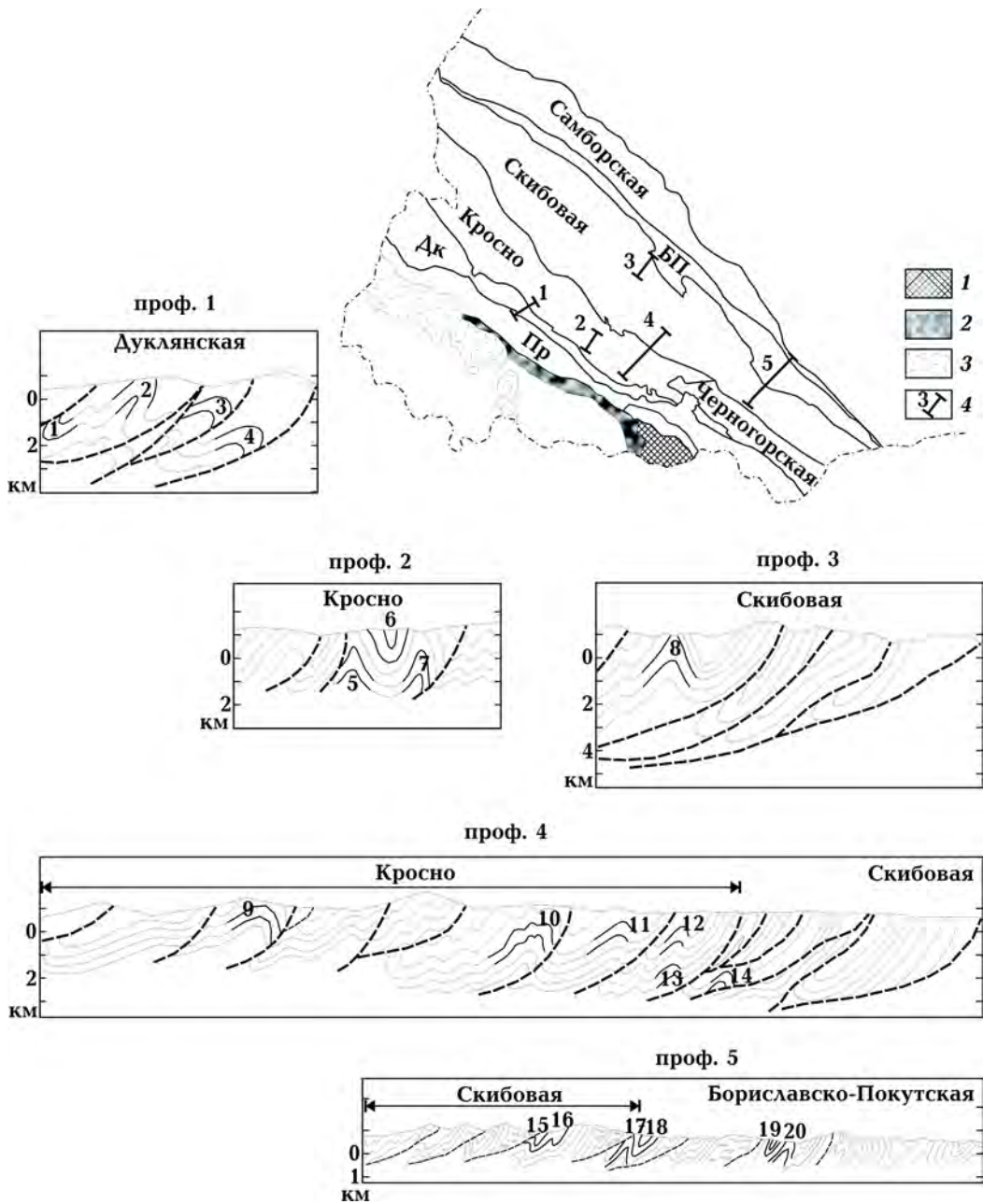


Рис. 4. Тектоническая схема УК и структурные профили по данным геологических съемок (1, 2 — [Державна ..., 2009 а], 3 — [Державна ..., 2007], 4 — [Державна ..., 2009 б], 5 — [Ва-щенко и др., 1985]): 1 — Мармарошский массив; 2 — зона Утесов; 3 — вулканический по-яс; 4 — расположение и номер профиля. На разрезах пронумерованы складки, для которых был выполнен структурный анализ.

ределение обстановок и величин деформирования выполняется индивидуально для каждой складки методом численного поиска наклона оси, описанным выше (см. рис. 3). Еще одним результатом численной процедуры будет нахождение исходной (до несоосного течения) формы склад-

ки. Пример расчета статистических функций и нахождения величин  $\beta$  и  $t$  для складки 2 из Дуклянской зоны показан на рис. 5, б. Минимумы частных функций  $S_1, S_2, S_3$ , как видно, более расплывчаты и не всегда однозначны. Минимум суммарной функции дает основание для однознач-

го выбора, хотя он не так четко выражен, как минимум модельной складки на рис. 3, б. В результате получаем  $\beta = 28^\circ$ ,  $t = 1,5$  млн лет (время, как уже указывалось, условно и соответствует длительности деформирования при заданной скорости  $0,315$  млн лет<sup>-1</sup>). Величина горизонтального сжатия  $d_f$ , согласно (4а), составит 1,3.

Возвращение в недеформированное состояние складки 2 дает асимметричную антиклиналь, близкую по форме к складке продольно-поперечного изгиба (рис. 5, в). Отклонения можно считать следствием неидеального изгиба — вариаций мощности исходного слоя, влияния вмещающих пород. Конечным результатом реконструк-

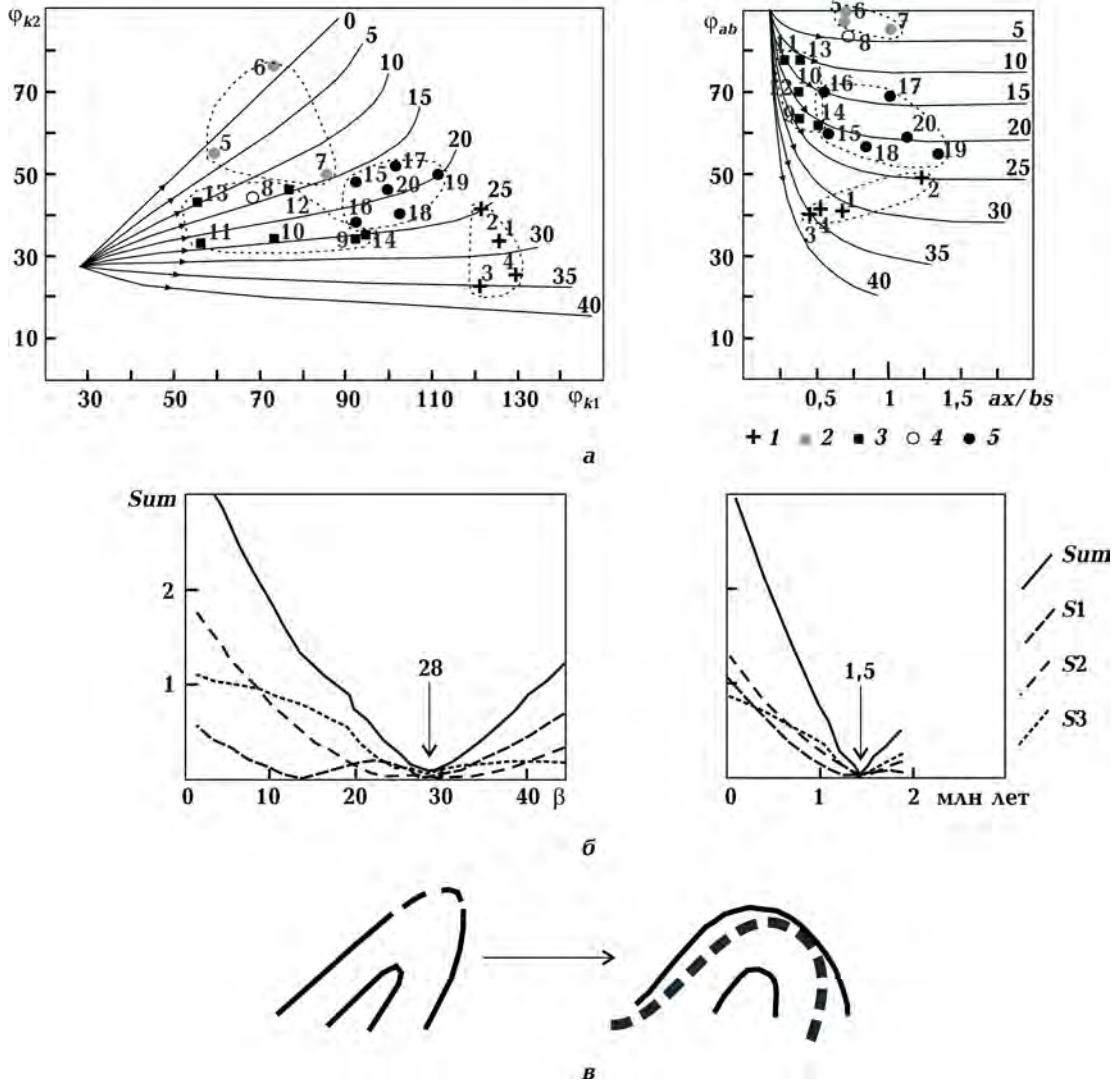


Рис. 5. Классификация складок УК и пример реконструкции: а — классификационно-генетические диаграммы складок, отмеченных на рис. 4 (1—5 — точки различных СФЗ: 1 — Дуклянской, 2 — Кросно (проф. 2), 3 — Кросно (проф. 4), 4 — Скибовая (проф. 3), 5 — Скибовая и Бориславско-Покутская (проф. 5)); штриховыми кривыми обведены точки, принадлежащие одним СФЗ и их участкам; вынесены траектории несоосного деформирования модельной складки 2; б — графики статистических функций для складки 2, определяющие угол наклона оси сжатия и длительность несоосного течения; в — реконструкция изгибной формы складки 2; жирная штриховая кривая — подобранная модельная складка продольно-поперечного изгиба. См. пояснения в тексте.



ции является определение величины общего горизонтального сжатия, включающего стадии изгиба и несоосного течения. Так как изгибное сжатие  $d_b = 1,56$  (по (3)), то, согласно (8), для данного случая имеем  $D = 2,03$  (двукратное сжатие).

Для семи складок, отобранных из разных зон, была выполнена реконструкция с определением составляющих полной деформации (рис. 6, а). В качестве исходных определены асимметричные складки разных размеров и степени сжатости, для которых подбирались наиболее соответствующие модельные складки продольно-поперечного изгиба. Для стадии несоосного течения показаны эллипсы конечной деформации. Полученные величины полного горизонтального сокращения (рис. 6, а, III) варьируют от 1,47 до 2,76, среднее значение — 2,17. С помощью диаграмм продольно-поперечного изгиба и несоосного течения определяются величины горизонтального сокращения, величины наклона сжимающих сил и другие характеристики этих двух обстановок для каждой складки (рис. 6, б и в).

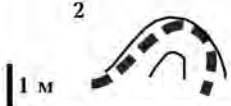













На примере рассмотренных складок оценим соотношение вкладов упругой и пластической составляющих в общую деформацию горизонтального сжатия (рис. 7, а). Как видно, за исключением складки 2, для которой вклад изгибной деформации больше, в остальных случаях вклад несоосного течения преобладает от умеренных (складки 17—19) до значительных (складки 7, 9, 10) степеней. Сравним углы наклона оси сжатия при изгибе и несоосном течении, которые дают анализируемые складки (рис. 7, б). В случае складки 7 углы наклона расходятся почти на порядок (20 и  $2,5^\circ$ ), однако у остальных складок они либо примерно равны, либо различаются не более чем в 2—2,5 раза. Отчетливо намечается тренд увеличения угла наклона оси сжатия при несоосном течении.

Получаемая близость углов наклона оси сжатия дает предпосылку объединения механизмов продольно-поперечного изгиба и несоосного течения в рамках об-

щей модели складчатого несоосного деформирования. Можно представить ситуацию, когда в объеме слоистой толщи, с самого начала подвергающейся деформации в обстановке несоосного течения при наклонном относительно слоев положении оси сжатия, находятся компетентные слои, которые реагируют на действие наклонного сжатия по закону продольно-поперечного изгиба. В этом случае жесткость складки будет примерно соответствовать величине горизонтального сжатия, скорость изгиба контролироваться скоростью течения в объеме, т. е. изгиб можно квалифицировать как эффективно вязкоупругий, вписывающийся по скорости деформирования в типичные рамки скоростей природной деформации. Непосредственно слои изгибной складки будут включаться в общий процесс пластического течения после преодоления ими предела пластичности, что контролируется их автономным напряженным состоянием [Гончар, 2008].

**Заключение и выводы.** Хотя структурная ткань Украинских Карпат выполнена складчатостью, изучению последней уделяется мало внимания. Здесь, имея в виду, в первую очередь, генетические аспекты проблемы образования типичных для УК асимметричных складок, применены прикладные разработки в рамках теорий упругого изгиба и несоосного течения [Гончар, 2001, 2008], которые восходят к ранним представлениям в области структурного анализа Е.И. Паталахи и его школы [Паталаха и др., 1974]. Согласно им складчатость возникает первоначально вследствие продольного сжатия слоя (пачки слоев) и потери им устойчивости на изгиб; дальнейшее ее развитие связано с переходом к пластическому деформированию (течению) в тех же или изменившихся силовых условиях. В основе такого понимания геологического складкообразования лежат предпосылки механики деформируемого твердого тела и гидромеханики [Теркот, Шуберт, 1985].

С помощью выполненного моделирования определены условия возникновения

I	II	III
2 	28 	$D = 1,56 \cdot 1,3 = 2,03$
7 	2,5 	$D = 1,22 \cdot 2,26 = 2,76$
9 	18 	$D = 1,06 \cdot 1,39 = 1,47$
10 	13 	$D = 1,03 \cdot 2,37 = 2,44$
17 	13 	$D = 1,27 \cdot 1,81 = 2,3$
18 	28 	$D = 1,27 \cdot 1,37 = 1,74$
19 	27 	$D = 1,49 \cdot 1,66 = 2,47$

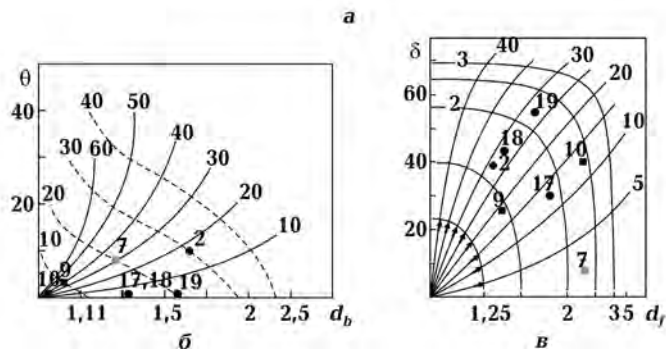


Рис. 6. Характеристика упругой и пластической составляющих полной несоосной деформации для некоторых складок: а — таблица, представляющая реконструированные формы и подобранные модельные аналоги продольно-поперечного изгиба (I), складки, трансформированные в условиях несоосного течения (II), и определяемые величины полной деформации горизонтального сжатия (III), первая цифра характеризует изгибную составляющую ( $d_b$ ), вторая — несоосное течение ( $d_r$ ); б и в — графическое отображение модельных аналогов реконструированных складок в поле диаграммы продольно-поперечного изгиба (б) и их позиция в конечном деформированном состоянии в поле диаграммы несоосного течения (в).

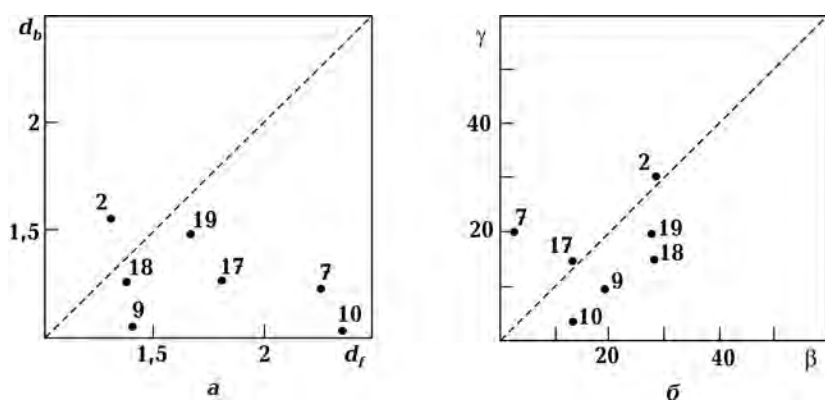


Рис. 7. Сопоставление полученных величин горизонтального сжатия при изгибе и несоосном течении (а) и наклонов изгибающей силы и оси максимального сжатия (б) для складок, изображенных на рис. 6.

карпатских складчатых структур, которые могут быть следствием как продольно-поперечного изгиба, так и горизонтального несоосного течения, наложенного на исходно симметричные или асимметричные изгибные складки. Показано, что эффективным методом диагностики в случае асимметричных складок является возвращение их в промежуточное деформированное состояние посредством снятия несоосного течения и статистический поиск наиболее вероятной ориентировки оси сжатия.

На основе выборочного морфологического анализа складчатости УК показано, что складки из разных структурно-фациальных зон имеют тенденцию к группированию, отображая тем самым специфику их формирования. Хотя полученные данные предварительны и могут пока служить лишь примером, тем не менее стоит отметить, что складки из Дуклянской зоны в центральном пересечении выделяются как обладающие высокой степенью сжатости и наибольшей асимметрией, складки зоны Кросно обладают разной деформированностью в разных пересечениях (слабой и средней), но у них оказывается наименьшая асимметрия. Складки Скибовой и Бориславско-Покутской зон в юго-восточном (Раховско-Покутском) пересечении сильно сжаты и их асимметрия приближается к таковой дуклянских структур.

В рамках модели горизонтального несоосного течения устанавливаются наклоны оси сжатия и длительность (интенсивность) деформирования, приведшие в итоге к наблюдаемым складчатым формам. Так, наиболее асимметричным складкам Дуклянской зоны соответствует значительный наклон оси сжатия около  $30^\circ$ ; складкам зоны Кросно, наиболее близким к симметричным формам (профиль 2), — весьма пологий, близкий к продольному (в среднем  $5^\circ$ ). Примечательным оказывается результат для складок Кросно вдоль профиля 3, Скибовой и Бориславско-Покутской зон вдоль профиля 4, которым соответствует единая средняя траектория с  $\beta = 20^\circ$ . Другими словами, складки этих зон деформированы в одинаковых условиях, но при разной интенсивности (длительности) деформирования, что свидетельствует об их разной тектонической позиции в пределах УК.

В качестве промежуточных изгибных складок УК после снятия деформации горизонтального несоосного течения определяются асимметричные формы, весьма близкие к теоретически рассчитываемым складкам продольно-поперечного изгиба. Последний, как и несоосное течение, обозначает разную реакцию на приложенную нагрузку, которая происходит при наклонном положении сжимающих сил относительно исходно горизонтальных слоев. Возникают предпосылки объединения меха-

низмов продольно-поперечного изгиба и несоосного течения в рамках общей модели складчатого несоосного деформирования. Такое "параллельное" соединение двух механизмов удобно в отношении палинспастических экспресс-реконструкций,

когда процесс деформирования с самого начала описывается в рамках теории несоосного течения. При этом достаточно легко можно получить количественное представление истории развития структур [Паталаха и др., 2003].

### Материалы геологических съемок:

1. Державна геологічна карта України м-ба 1 : 200 000. Хуст — Бая-Маре. 2009.
2. Державна геологічна карта України м-ба 1 : 200 000. Надвірна — Вишеу-Десус. 2009.
3. Державна геологічна карта України м-ба 1 : 200 000. Івано-Франківськ. 2007.
4. Ващенко В. А. и др. Групповая геологическая съемка м-ба 1 : 50 000 водораздельной части ЮВ Карпат. 1985.

### Список литературы

Ажгирей Г. Д. Структурная геология. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1966. 348 с.

Астахов К. П. Альпийская геодинамика Украинских Карпат: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Москва, 1989. 22 с.

Бубняк І. М., Накапелюх М. В., Віхоть Ю. М. Збалансований геологічний розріз Українських Карпат у перетині Берегомет—Буркут. *Геодинаміка*. 2014. № 1. С. 72—87. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geod\\_2014\\_1\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geod_2014_1_9).

Гинтов О. Б., Бубняк І. Н., Віхоть Ю. М., Муровская А. В., Накапелюх М. В., Шлапинский В. Е. Тектонофизический и палинспастический разрезы Украинских Карпат вдоль геотраверса DOBRE-3 (PANCAKE). *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 3. С. 3—33. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116050>.

Гнилко О. Терейновий аналіз та геологічна еволюція Карпат. *Вісник Львів. ун-ту. Сер. геол.* 2011. Вип. 25. С. 174—188.

Гончар В. В. Изгибные асимметричные складки краевых прогибов по данным численного моделирования. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 4. С. 60—82.

Гончар В. В. Механизм покровообразования

при аккреции отложений Предкарпатского прогиба. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2012. № 1-2. С. 117—128.

Гончар В. В. Прогрессивная несоосная деформация и вопросы диагностики структур. *Доповісті НАН України*. 2001. № 9. С. 108—113.

Накапелюх М. В., Бубняк І. М. Збалансований розріз відслонення "Тартак" (Скибовий покрив Українських Карпат). *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 3. С. 105—114.

Николя А. Основы деформации горных пород. Москва: Мир, 1992. 167 с.

Паталаха Е. И. Тектонофаціальний аналіз складчатих сооружений фанерозоя. Москва: Наука, 1985. 168 с.

Паталаха Е. И., Гончар В. В., Сенченков І. К., Червченко О. П. Элементы геодинамики Карпат. Киев: ЕКМО, 2003. 151 с.

Паталаха Е. И., Лукиенко А. И., Гончар В. В. Тектонические потоки как основа понимания геологических структур. Киев: Феникс, 1995. 160 с.

Паталаха Е. И., Смирнов А. В., Поляков А. И.

- Генетические типы геосинклинальной складчатости. Алма-Ата: Наука, 1974. 254 с.
- Попов Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней. Москва: Наука, 1986. 294 с.
- Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Ч. 1, 2. Москва: Мир, 1985. 730 с.
- Gagaia J., Vergés J., Saura E., Malata T., Ringenbach J.-C., Werner P., Krzywies P., 2012. Architecture and orogenic evolution of the northeastern Outer Carpathians from cross-section balancing and forward modeling. *Tectonophysics* 532—535, 223—241. doi: 10.1016/j.tecto.2012.02.014.
- McKenzie D., 1979. Finite deformation during fluid flow. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 58, 689—715.
- Weijermars R., Poliakov A., 1993. Stream functions and complex potentials: implications for development of rock fabric and the continuum assumption. *Tectonophysics* 220 (1—4), 33—50. doi: 10.1016/0040-1951(93)90222-6.

## Models of out-of-line deformation in structural analysis of folding of the Ukrainian Carpathians

© V. V. Gonchar, 2018

Structural analysis and reconstruction of folding of the Ukrainian (flysh) Carpathians have been executed according to materials (cross-sections) of medium-scale geological survey. Methodic development has been used within the limits of bending and out-of-flow theories. It has been shown with the help of asymmetric folding simulation that the recapture of folds into intermediate deformed state by removal of out-of-line flow and the statistic search of the most probable orientation of compression axis is the effective method of diagnostics.

Conditions of appearance of Carpathians structures have been identified which can be a result of both longitudinal-transverse bending and horizontal out-of-line flow superimposed upon initially symmetric or asymmetrical bending folds. Within the limits of models of out-of-line deformation inclinations of compression axis and intensity of deformation are being determined which finally resulted in observed folding forms, specification of folds from different structural-facial zones of Carpathians according to the grade of their compactness and asymmetry has been shown, their genetic interpretation has been given.

**Key words:** Ukrainian Carpathians, folding, longitudinal-transverse bending, out-of-line flow, modeling, reconstruction.

### References

- Azhgirey G. D., 1966. Structural Geology. Moscow: Publ. House of the Moscow University, 348 p. (in Russian).
- Astakhov K. P., 1989. Alpine geodynamics of the Ukrainian Carpathians: Abstract of the disc. cand. geol. and min. sci. Moscow, 22 p. (in Russian).
- Bubnyak I. M., Nakapelyuk M. V., Vikhot Yu. M., 2014. Balanced geological section of the Ukrainian Carpathians at the intersection of Beregomet—Burkut. *Geodynamika* (1), 72—87 (in Ukrainian). [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geod\\_2014\\_1\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geod_2014_1_9).
- Gintov O. B., Bubnyak I. N., Vikhot Yu. M., Mu-

- rovskaya A. V., Nakapelyukh M. V., Shlapin-skiy V. E., 2014. Tectonophysical and palispastic sections of the Ukrainian Carpathians along the geotraverse DOBRE-3 (PANCAKE). *Geofizicheskiy zhurnal* 36 (3), 3—33 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116050>.
- Hnylko O., 2011. The Terein Analysis and the Geological Evolution of the Carpathians. *Visnyk Lvivskogo universytetu. Ser. geol.* (25), 174—188 (in Ukrainian).
- Gonchar V. V., 2008. Bending asymmetric folds of marginal troughs according to the data numerical experiment. *Geofizicheskiy zhurnal* 30 (4), 60—82 (in Russian).
- Gonchar V. V., 2012. The mechanism of covering formation during the accretion of sediments of the Precarpathian trough. *Heolohiya i heokhimiya horyuchykh kopalyn* (1-2), 117—128 (in Russian).
- Gonchar V. V., 2001. Progressive non-axial deformation and problems of structural diagnostics. *Dopovidi NAN Ukrayiny* (9), 108—113 (in Russian).
- Nakapelyuk M. V., Bubnyak I. M., 2013. Balanced cross-section of the outcrop "Tartak" (Skyba nappe of the Ukrainian Carpathians). *Geofizicheskiy zhurnal* 35 (3), 105—114 (in Ukrainian).
- Nikolya A., 1992. Fundamentals of rock deformation. Moscow: Mir, 167 p. (in Russian).
- Patalakha Ye. I., 1985. Tectonofacial analysis of the folded structures of the Phanerozoic. Moscow: Nauka, 168 p. (in Russian).
- Patalakha Ye. I., Gonchar V. V., Senchenkov I. K., Chervinko O. P., 2003. Elements of the geodynamics of the Carpathians. Kiev: EKMO, 151 p. (in Russian).
- Patalakha E. I., Lukienko A. I., Gonchar V. V., 1995. Tectonic flows as the basis of understanding of geological structures. Kiev: Feniks, 160 p. (in Russian).
- Patalakha Ye. I., Smirnov A. V., Polyakov A. I., 1974. Genetic types of geosynclinal folding. Alma-Ata: Nauka, 254 p. (in Russian).
- Popov Ye. P., 1986. Theory and calculation of flexible elastic rods. Moscow: Nauka, 294 p. (in Russian).
- Terkot D., Schubert J., 1985. Geodynamics. Pt. 1, 2. Moscow: Mir, 730 p. (in Russian).
- Gagaia J., Vergés J., Saura E., Malata T., Ringenbach J.-C., Werner P., Krzywiec P., 2012. Architecture and orogenic evolution of the northeastern Outer Carpathians from cross-section balancing and forward modeling. *Tectonophysics* 532—535, 223—241. doi: 10.1016/j.tecto.2012.02.014.
- McKenzie D., 1979. Finite deformation during fluid flow. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 58, 689—715.
- Weijermars R., Poliakov A., 1993. Stream functions and complex potentials: implications for development of rock fabric and the continuum assumption. *Tectonophysics* 220 (1—4), 33—50. doi: 10.1016/0040-1951(93)90222-6.

## Комплекс экспериментальных исследований электрических свойств горных пород в инертной среде

© М. В. Кравчук, В. А. Корчин, В. П. Коболев, Н. И. Новик, 2018

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 2 октября 2017 г.

Детально описано конструкцію і розглянуто апаратурно-методичні особливості розробленого і реалізованого в Інституті геофізики НАН України автоматизованого вимірювального комплексу, призначеного для дослідження електричних параметрів мінеральної речовини за температур до 1100 °С у кисневмісному та інертному середовищах. Наведено результати деяких експериментів, виконаних на етапі дослідних випробувань комплексу в температурному інтервалі від кімнатної до 700 °С. Досліджено та проаналізовано чинники, що впливають на характер отриманих температурно-частотних залежностей електричних параметрів зразків порід. Показано, що утворення оксидів у кисневмісному середовищі збільшує електричний опір. Різниця градієнта зміни величини  $\rho$  від температури, особливо в інтервалі 300—500 °С, зумовлена тим, що електропровідність здійснюється в основному іонами домішок і дефектами кристалічної ґратки. За підвищення температури діелектрична проникність іонних кристалів зростає внаслідок ослаблення зв'язку між окремими іонами. Низькочастотна діелектрична проникність найчутливіша до деформаційних фазових переходів і є інформативнішим параметром, оскільки змінюється з найбільшим градієнтом.

**Ключові слова:** *PT*-петрофізика, електричні параметри, вимірювальний комплекс, інертне середовище.

**Введение.** Изучение электрических параметров минерального вещества, их изменений и взаимосвязей в широком диапазоне температур и давлений является неотъемлемой составной частью фундаментальных комплексных геофизических исследований глубинного строения Земли.

Возможности экспериментальной *PT*-петрофизики с целью прогнозирования распределения физических свойств и состава геологической среды на различных глубинах далеко не исчерпаны [Корчин и др., 2011, 2013], но требуют более тщательного подхода к чистоте экспериментальных измерений в различных термодинамических и физико-химических обстановках. Прежде всего, это касается влияния

окислительных процессов при воздействии высоких температур в процессе экспериментальных измерений электрических свойств пород. Это обстоятельство предопределило задачу создания экспериментального комплекса для измерения электрических параметров образцов минералов и горных пород при их нагреве в нейтральной среде.

Для устранения влияния окислительных процессов при изучении электрических свойств минеральных образований при высоких температурах в качестве нейтральной среды используется аргон [Shanov et al., 2000]. Это позволяет минимизировать окислительные процессы в образцах горных пород при воздействии высо-

ких температур, так как окисление железосодержащих минералов в этом случае будет обусловлено главным образом внутренним кислородным потенциалом.

В настоящей статье рассмотрены аппаратно-методические особенности разработанного и реализованного в Институте геофизики НАН Украины автоматизированного измерительного комплекса, предназначенного для исследования электрических параметров минерального вещества при температурах до 1100 °С в нейтральной среде [Кравчук, Корчин, 2014].

**Конструкция измерительного комплекса.** При создании измерительного комплекса максимально использована современная высокоточная измерительная аппаратура с автоматической регистрацией и последующей обработкой результатов измерений на компьютере.

На рис. 1 приведена блок-схема автоматизированного комплекса измерения электрических параметров минерального вещества при высоких температурах с использованием нейтральной среды.

Блок нагрева обеспечивает регулирование температуры образца, контроль подачи инертного газа (аргона) в камеру печи, а также измерение и передачу исходных данных на компьютер. Результаты измерений, наряду с исходными данными текущего температурного режима блока нагрева, регистрируются в базе данных компьютера. Последний обеспечивает ав-



Рис. 1. Блок-схема автоматизированного комплекса измерения электрических параметров минерального вещества.

томатическое согласование и обработку полученной от нагревательного и измерительного блоков информации.

При конструировании блока нагрева большое внимание уделялось подбору материалов и дополнительных устройств, которые могли бы соответствовать предъявляемым техническим требованиям. Футеровка печи выполнена из смеси порошка электрокорунда, шамотной огнеупорной глины (мергеля), жидкого стекла и воды. Держатели электродов изготовлены из пиррофиллита ( $H_2Al_2(SiO_3)_4$  гидросиликат алюминия), который прост в обработке и приобретает хорошую прочность и устойчивость к нагрузкам после закалки, а также имеет хорошие термо- и электроизоляционные свойства. В качестве термоизоляции камеры нагрева были выбраны асбест и базальтовая вата. Сконструированная система рычагов, шарниров и пружин прижимного устройства позволила обеспечить максимально плотное прилегание электродов к граням образца породы с необходимым свободным ходом для компенсации влияния линейного теплового расширения.

Подача инертного газа в камеру нагрева контролируется и регулируется ротаметром РМ 0,63 (УЗ ГОСТ 13 045-81). Используемая модель представляет собой стеклянную трубу с кольцевыми уплотнениями. Сечение трубы с тремя гранями, параллельными центральной оси, обеспечивает самоцентрирование поплавка в потоке. Такая конструкция позволяет проводить измерения давления газа в камере с высокой точностью. Опционный защитный прозрачный кожух из поликарбоната обеспечивает обзор 180°. Ротаметр оснащен кольцевыми уплотнениями и сигнализаторами предельных значений расхода газа. Замена трубки и поплавка может производиться без демонтажа корпуса.

Контроль температуры в камере нагрева осуществляется многофункциональным двухканальным измерителем-регулятором ОВЕН 2ТРМ1 с универсальными измерительными входами (Руководство по эксплуатации, ОВЕН 2ТРМ1). По устойчивости



к электромагнитным воздействиям и уровню излучаемых радиопомех он соответствует оборудованию класса В по ГОСТ 29216. Предел основной приведенной погрешности при работе с термоэлектрическими преобразователями составляет  $\pm 0,5\%$ , термопреобразователями сопротивления и унифицированными сигналами постоянного напряжения и тока —  $\pm 0,25\%$ .

Электрические характеристики исследуемого образца горной породы измеряются прибором RLC-meter МНС-1100 [Руководство ..., 2008]. RLC-метр предназначен для автоматического определения параметров импеданса (емкости (С), индуктивности (L), активного сопротивления (R), взаимной индуктивности (M), тангенса угла потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ) и тангенса угла фазового сдвига ( $\operatorname{tg} \varphi$ ) (добротности ( $Q_C$  и  $Q_L$ )) по любой из двухэлементных схем замещения, а также процентных отклонений с представлением результатов измерений в цифровом виде. RLC-метр обеспечивает: автоматический выбор характера реактивности объекта измерений по критерию "превалирующий параметр"; учет начальных параметров; усреднение результатов измерений; устранение влияния сетевых помех (на отдельных оговоренных частотах); измерение с регулировкой значения напряжения переменного тока, подаваемого на объект измерения. Прибор имеет два режима измерений: разовый — для измерения неизвестных величин; следящий — для непрерывного измерения изменяющихся во времени величин, обеспечивает четырехпарное подключение объекта измерения и может подключаться к ПК через последовательный интерфейс RS232. Основные технические характеристики прибора представлены в таблице.

Связь RLC-метра МНС-1100 с компьютером осуществляется по протоколу MODBUS RTU. МНС-1100 определен как ведомое устройство и отвечает на запросы, поступающие от ведущего устройства (ПЭВМ). Обмен между устройством и ПЭВМ состоит из двух сообщений. Первое — запрос, который поступает от ПЭВМ к ведомому

устройству. Второе — одиночный ответ, который поступает от ведомого устройства к ПЭВМ. Оба отформатированы как сообщения протокола MODBUS, называемые пакетами. Каждый пакет состоит из последовательности байтов, сгруппированных в четыре поля, описанных ниже.

**Адресное.** Состоит из одного байта. В формате пакета этот байт определяет адрес устройства, к которому направляется запрос. Каждому ведомому устройству в протоколе MODBUS присваивается свой неповторяющийся адрес.

**Функциональное поле.** Состоит из одного байта. Определяет функцию, которую ведомое устройство должно выполнить. Если ведомое устройство может выполнить запрашиваемую функцию, то функциональное поле ответа будет таким же, как и поле запроса, если не может, то функциональное поле возвращается с единицей в старшем разряде. Это сообщает ПЭВМ, что ведомое устройство возвращает сообщение об ошибке.

**Поле данных.** Длина поля зависит от типа функции.

**Поле проверки.** Значение этого поля вычисляется путем выполнения циклического контроля (CRC-16).

Синхронизация пакетов осуществляется за счет задания ограничения интервала

#### Основные технические характеристики RLC-метра МНС-1100

Измеряемая величина	Диапазон
$R$ , Ом	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{11}$
$C$ , Ф	От $1 \cdot 10^{-17}$ до 10
$R_{\text{пт}}$ , Ом	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{11}$
$\operatorname{tg} \delta$ , отн. ед.	От $1 \cdot 10^{-5}$ до 65535
$\operatorname{tg} \varphi$ , отн. ед.	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $\pm 65535$
Процентные отклонения	$\pm 100$

ла времени между последовательными байтами в пределах одного сообщения. Если за время, необходимое на прием трех байт, не будет распознан новый, то следующий принятый байт будет рассматриваться как адресное поле нового сообщения.

Для записи данных, полученных в процессе измерений, используется приложение "RLC-Meter". В результате получаем файл в текстовом формате, с которым можно работать в любом табличном редакторе (например в Microsoft Office Excel).

Принципиальная схема конструкции автоматизированного комплекса измере-

ния электрических свойств (АКИЭС) приведена на рис. 2.

Основными структурными элементами комплекса являются: блок нагрева, измеритель и регистратор (компьютер). Электрический нагреватель (1) представляет собой раздвижную термоизолирующую камеру с нихромовой спиралью диаметром 1 мм, которая намотана на кварцевую трубку и помещена в армированный цилиндрический корпус, футерованный высокотемпературной обмазкой. Дополнительно надежная теплоизоляция обеспечивается базальтовой ватой. Верхняя часть термо-

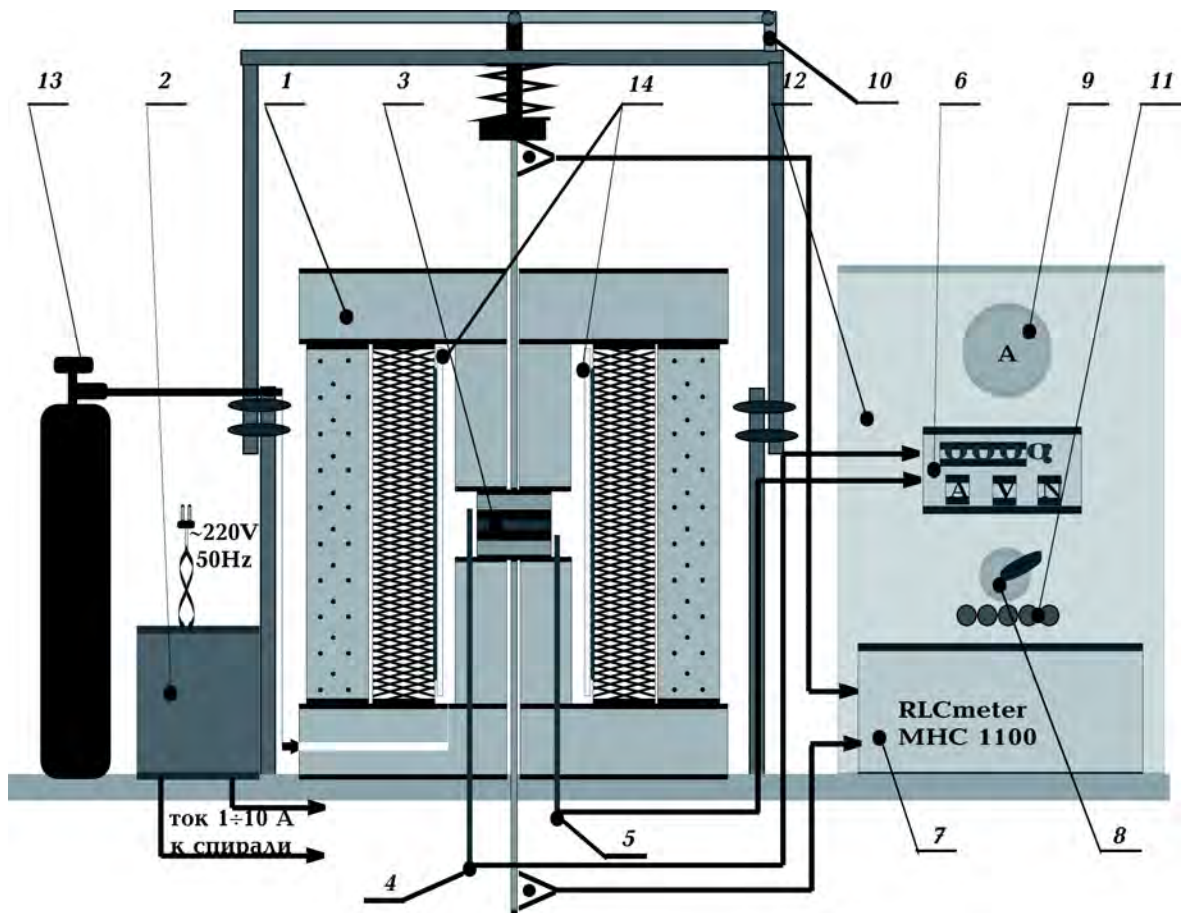


Рис. 2. Принципиальная схема конструкции автоматизированного комплекса измерения электрических свойств (АКИЭС): 1 — нагреватель электрический (спираль — нихром); 2 — регулятор тока тиристорный БУЗ509-3282УХЛ4; 3 — образец породы; 4 — термопара ХА (верхняя); 5 — термопара ХА (нижняя); 6 — измеритель-регулятор 2ТРМ1; 7 — прибор RLC-meter МНС-1100; 8 — потенциометр установки тока нагревателя; 9 — амперметр контроля тока; 10 — прижимное устройство; 11 — клемники для четырехпарного подключения RLC-метра; 12 — приборная панель; 13 — баллон нейтрального газа; 14 — кварцевая трубка.

камеры защищена асбестовой крышкой (толщиной 30 мм), в которую вмонтирован пиррофиллитовый держатель электродов. В нижней части термокамеры есть отверстие с конической фаской, которая при опускании камеры на нижний опорный держатель центрирует электроды. В качестве источника питания постоянного тока используется тиристорный регулятор (2), обеспечивающий нагрев исследуемого образца породы до 1100 °С.

Образец (3) размещается внутри камеры нагрева между никелевыми или графитовыми электродами. Температура образца контролируется термопарами (4, 5), термоэдс от которых усредняется и поступает на многофункциональный двухканальный измеритель-регулятор 2ТРМ1 (6). Измеритель-регулятор работает в режиме контроля или регулирования температуры образца по заданной программе. Изучаемые параметры образца фиксируются прецизионным прибором МНС-1100 (7). Никелевые электроды и нихромовые токоподводы позволяют проводить исследования до температуры 1100 °С. Ток нагревательной спирали устанавливается переменным резистором (8) и контролируется амперметром (9). С помощью тумблеров установка включается в режим контроля или автоматического регулирования температуры нагрева. Приборы размещены на панели (12). Для устранения влияния окислительных процессов при нагреве образцов в начале опытов в камеру нагревателя из баллона (13) подается аргон под регулируемым избыточным давлением. По окончании процесса измерений верхняя часть нагревателя поднимается специальным подъемным механизмом и образец извлекается из камеры нагрева.

**Результаты испытаний.** Установка прошла опытные испытания на соответствие планируемым параметрам. Измерения температурных зависимостей электрических характеристик горных пород важно проводить в зоне с наименьшим градиентом для обеспечения равномерного нагрева образца. С целью определения такой зо-

ны независимой термопарой были сделаны замеры температуры вдоль ствола печи с шагом 10 мм. При фиксированных температурах в измерительной ячейке — 250, 500 и 700 °С (контроль производился многофункциональным двухканальным измерителем-регулятором ОВЕН 2ТРМ1) и для каждой зафиксированной температуры были построены кривые ее изменений (рис. 3), из которых следует, что зона с наименьшим температурным градиентом находится на уровне 100—150 мм от дна камеры и пространственно совпадает с измерительной ячейкой.

Полученные результаты тарировки установки позволили перейти к отработке методики измерений электрических параметров горных пород.

В качестве материала для эксперимента были подобраны образцы габбро (среднезернистый), базальта (мелкозернистый) и розового кварцита (мелкозернистый мноминеральный). Кварциты (овручская серия верхнего протерозоя) отобраны в северной части северо-западного района Украинского щита (УЩ); базальты (вендская трапповая формация) — в пределах западного склона УЩ; габбро (букинский

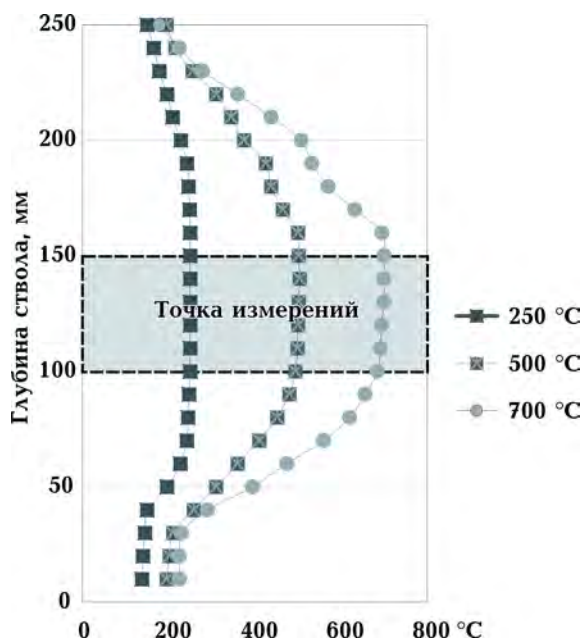


Рис. 3. Температурный градиент в стволе печи.

комплекс нижнего протерозоя) — в пределах южной части северо-западного района УЩ. Из блоков пород были изготовлены шлифы, по которым выполнено их петрографическое описание. Исследованный образец розового кварцита представляет собой мелкозернистую мономинеральную породу гранобластовой структуры, состоящую из изометричных неправильной формы (часто угловатых) зерен кварца. Габбро — средне-зернистая порода, состоящая из аллотриоморфных, реже призматических и таблитчатых зерен плагиоклаза, пироксена, а также зерен рудного минерала, апатита и чешуек биотита. Базальт представлен мелкозернистой разновидностью, состоящей из большого количества беспорядочно расположенных лейст плагиоклаза, в угловатых промежутках между которыми присутствуют пироксен и рудный минерал. Образцы изготавливались в форме дисков диаметром 21 мм и высотой от 4 до 14 мм, по несколько дублей разной высоты. Пробы брались естественно-сухими. Образцы помещались в камеру нагрева, куда подавался аргон. Производились измерения их электрических характеристик с повышением температуры (с шагом 50 или 100 °С). Скорость нагревания — 10 град / мин. В каждой "температурной точке" измерений делались десятиминутные временные выдержки для равномерного распределения тепла по объему образца.

**Результаты экспериментальных исследований.** Удельное электрическое сопротивление образцов пород определялось по измеренным значениям электрического сопротивления по формуле  $R = \rho l / S$ , где  $S$  — площадь электродов;  $l$  — толщина образца. Относительная диэлектрическая проницаемость рассчитывалась по формуле для емкости плоского конденсатора:  $C_x = \epsilon \epsilon_0 \cdot S / l$ . Полученные данные обрабатывались в приложении Microsoft Office Excel.

В ходе эксперимента для некоторых пород были получены частотные температурные зависимости удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) на постоянном

токе и частотах 100 Гц, 1, 10 и 100 кГц, а также относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) на частотах от 100 Гц до 100 кГц (рис. 4—7). Изучение электрических параметров в выбранном частотном диапазоне (от 0 до 100 кГц) представляет особый интерес, так как именно он преобладает при геоэлектрических исследованиях земной коры [Шепель, Кравчук, 2007].

Характерная особенность кривых электросопротивления образца розового кварцита — наличие "провала" в интервале температур 400—600 °С (рис. 4, а), что предположительно связано с полиморфным переходом (573 °С)  $\alpha$ -кварца в  $\beta$ -кварц ( $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> ↔  $\beta$ -SiO<sub>2</sub>). Этот фазовый переход является деформационным, затрагивающим первую координационную сферу. Деформационные переходы происходят без разрыва химической связи, путем ее искажения. При таких переходах происходит лишь небольшое изменение кристаллической решетки. Энергия активации таких переходов мала, поэтому они относятся к "быстрым переходам" [Гуфан, 1982; Жданов, 1988].

В этой температурной области также можно наблюдать скачкообразное увеличение относительной диэлектрической проницаемости от единиц до нескольких десятков (рис. 4, б), что характерно для сегнетоэлектрической точки Кюри [Павлов, Хохлов, 2000]. Наиболее выражена эта аномалия в области низких частот.

Температурно-частотные зависимости электрических характеристик образцов габбро представлены на рис. 5, 6. Один из дублей породы исследовался в инертной среде (рис. 5, а), а другой — без подачи аргона в камеру нагрева (рис. 5, б). В области поляронной проводимости (20—200 °С) вначале происходит понижение электрического сопротивления пород (интервал температур 20—100 °С), а затем увеличение, что связано с удалением влаги, присутствующей на границах зерен. Кривые электросопротивления образца, исследованного в окислительной среде, отличаются большим количеством изло-

мов с разным углом наклона кривых. Это соответствует разным энергиям активации токоносителей и, возможно, связано с окислительными процессами при более высокой концентрации кислорода [Кравчук, Корчин, 2015].

Образование оксидов в кислородсодержащей среде повышает электрическое сопротивление, что обусловлено ионными связями при малых ионных радиусах катионов, обладающих незначительной поляризуемостью [Пархоменко, 1984].

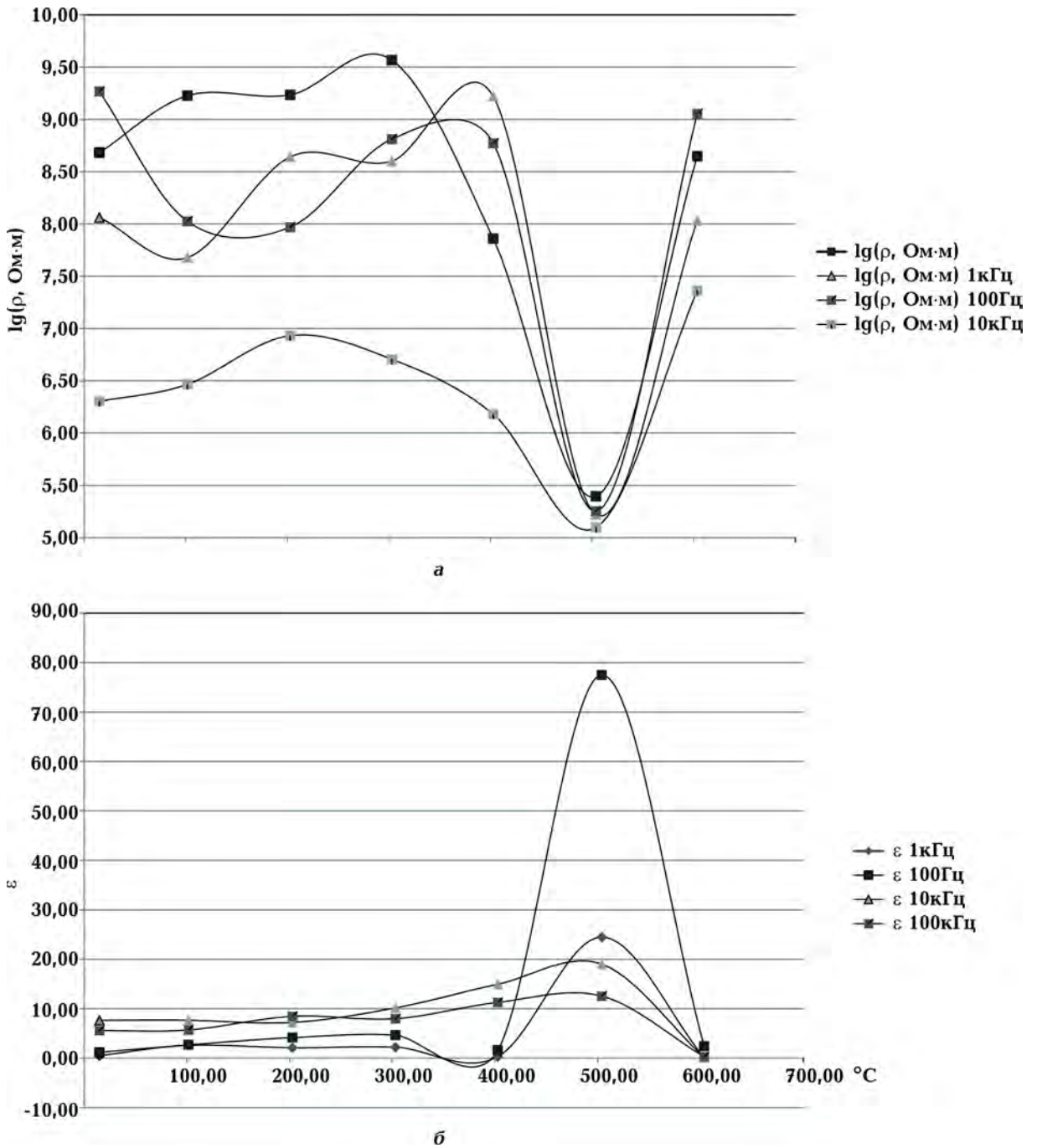


Рис. 4. Температурно-частотные зависимости логарифма электрического сопротивления (а) и относительной диэлектрической проницаемости (б) образца розового кварцита.

Характер зависимости от температуры и частоты электрических параметров образца базальта схож с аналогичными зависимостями для габбро, что связано с подобностью минерального состава исследованных пород (рис. 7).

В низкотемпературной области в образцах вначале наблюдается уменьшение электрического сопротивления (при температурах до 100 °С) и некоторое его увеличение в результате удаления влаги из открытых пор (до 200 °С). С дальнейшим

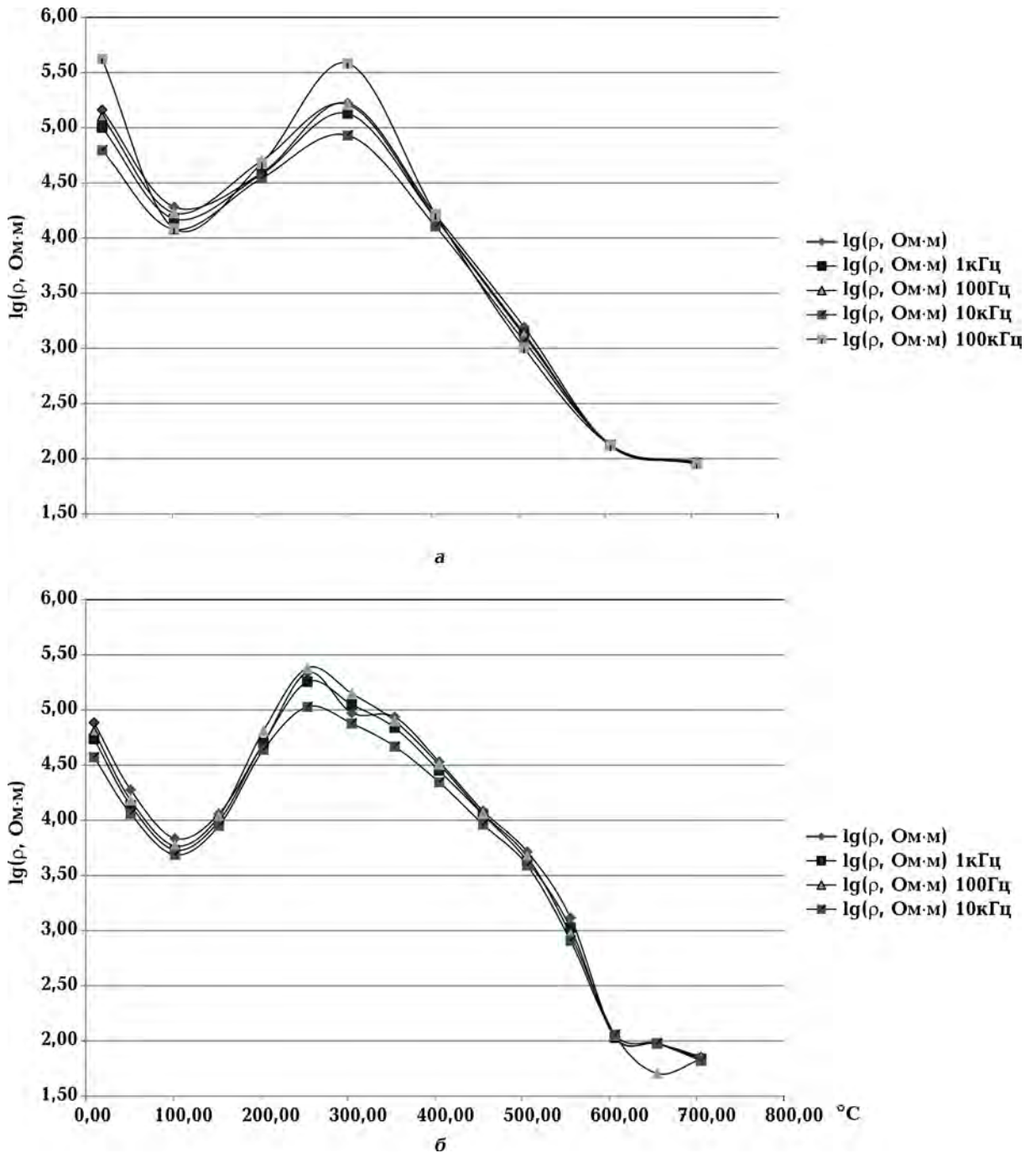


Рис. 5. Температурно-частотные зависимости логарифма электрического сопротивления образца габбро: в инертной среде (а), в окислительной (б).

повышением температуры электрическое сопротивление равномерно падает. Характер кривых диэлектрической проницаемости обратный — с повышением температуры  $\epsilon$  увеличивается, что характерно для ионно-релаксационного механизма по-

ляризации, наблюдаемом в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов в кристаллической решетке. При этом низкочастотная диэлектрическая проницаемость увеличивается с наибольшим градиентом.

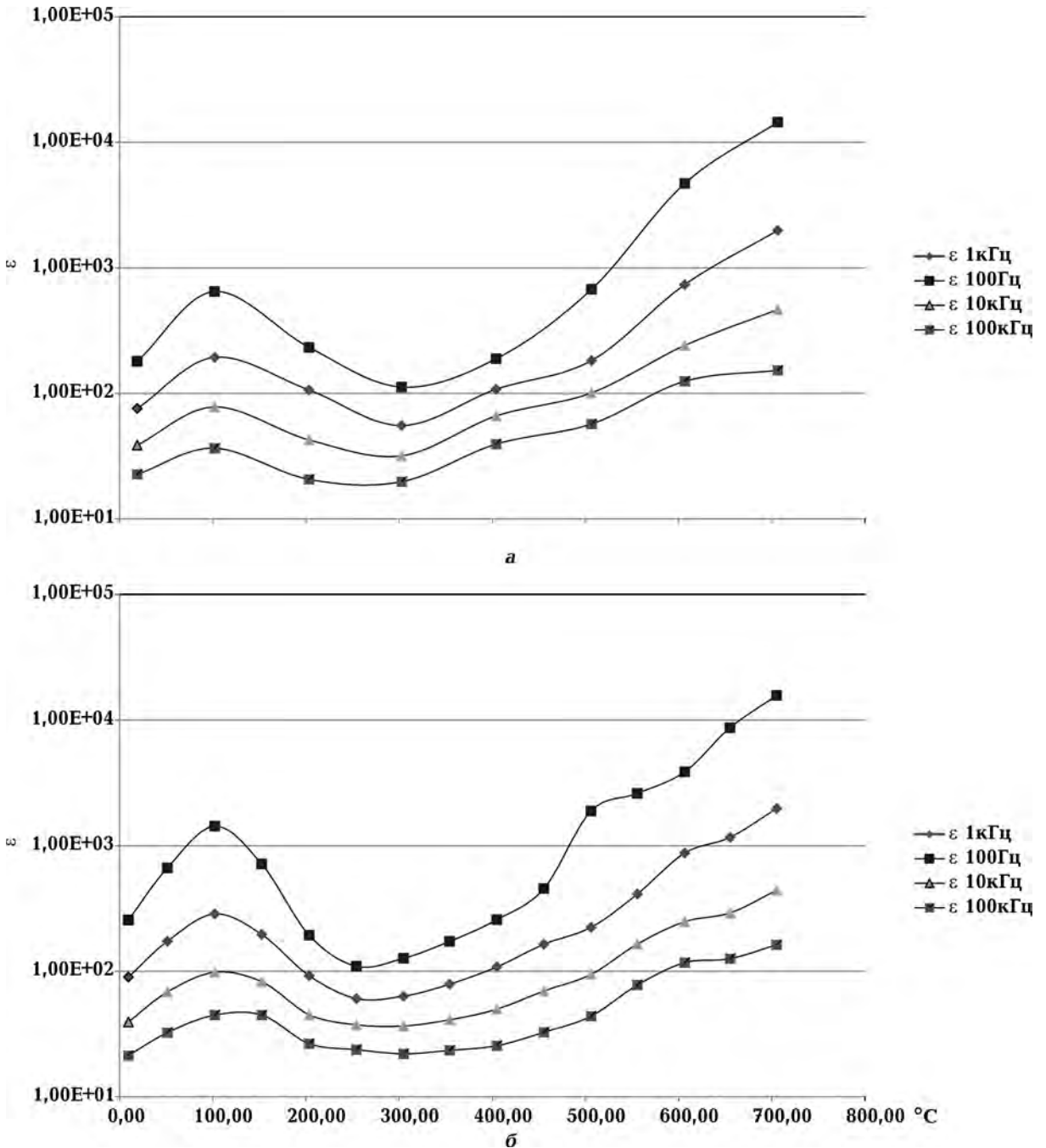


Рис. 6. Температурно-частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости образца габбро: в инертной среде (а), в окислительной (б).

**Обсуждение результатов.** Большинство минералов и горных пород являются ионными кристаллическими диэлектриками. Ионная электропроводность, как правило, испытывает увеличение с температурой. Однако на кривых электросопротивления выделяют несколько разноградиентных областей, в которых элект-

рическое сопротивление приближенно является линейной функцией температуры.

Очевидно, области различаются типом электропроводности. Выделяют три типа последней: поляронная, примесная и собственная.

1. *Поляронная проводимость.* Осуществляется электронами или ионами, колеб-

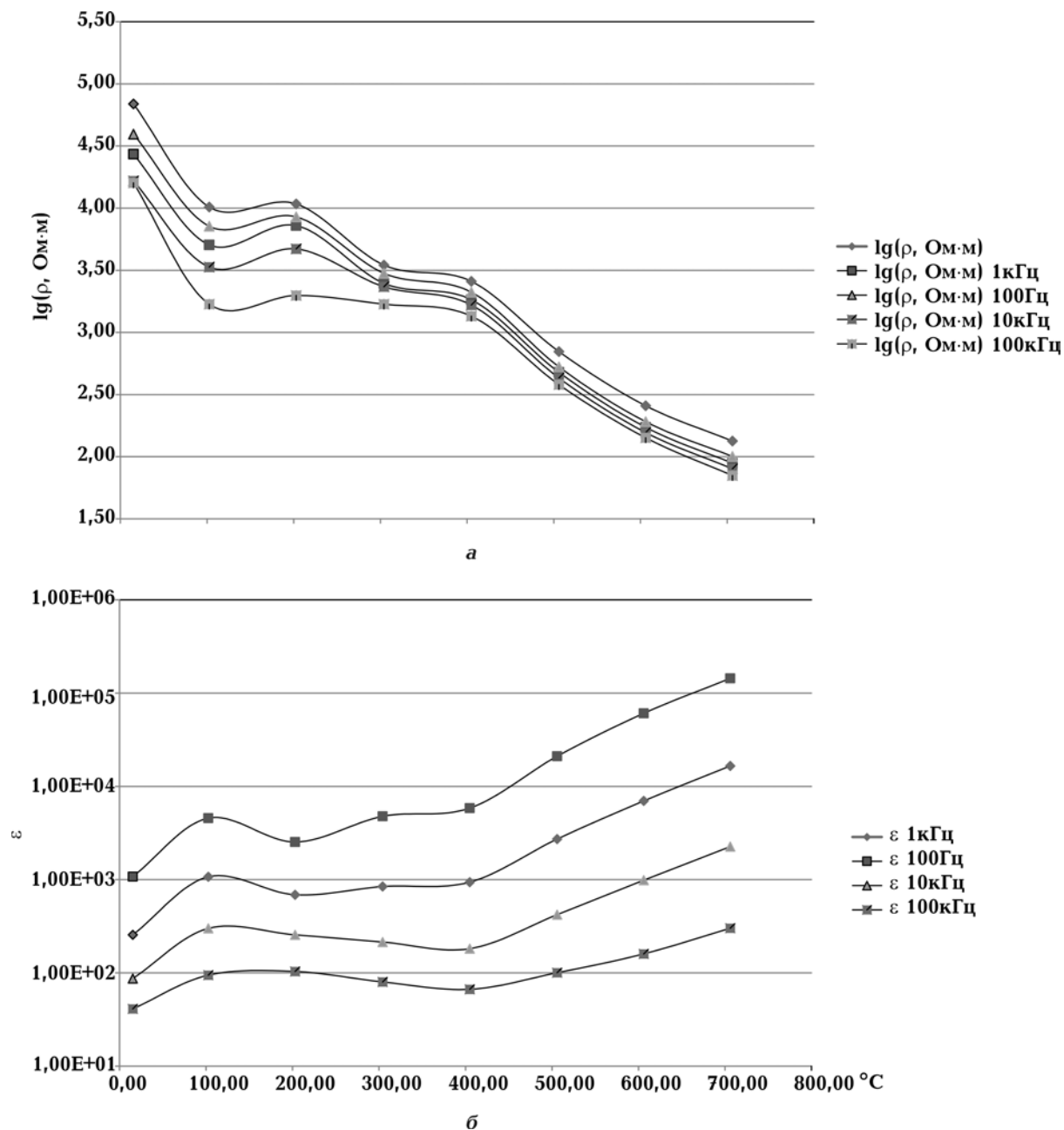


Рис. 7. Температурно-частотные зависимости электрических характеристик образца базальта: а — зависимости логарифма электрического сопротивления, б — диэлектрической проницаемости.



лющимися в фононном поле кристаллической решетки, характерна для низкотемпературной области (от комнатной до 200 °С). Во многих диэлектриках подвижность электронов и дырок чрезвычайно мала — в сотни и даже тысячи раз ниже, чем в полупроводниках. Столь низкие значения подвижности связаны с тем, что электроны находятся в этих веществах в связанном состоянии, образуя квазичастицы (поляроны). Таким образом, кроме электронного механизма проводимости в диэлектриках может существовать также и другой механизм переноса заряда, получивший название поляронного. Поляронная проводимость возникает в том случае, когда электроны или дырки сильно связаны с кристаллической решеткой. При низкой концентрации свободных носителей заряда в диэлектриках может существовать электрическое поле, приводящее к смещению связанных зарядов (поляризации). В ряде случаев электроны проводимости поляризуют своим полем окружающую их область диэлектрика и локализуются в ней. Эта область искаженной решетки вместе с находящимся в ней электроном (или дыркой), вызвавшим искажение, и получила название полярона. Под действием электрического поля электрон перемещается вместе с поляризованной областью, т. е. происходит движение полярона.

Поляронная проводимость характерна для ионных кристаллов, где кулоновское взаимодействие между электронами и ионами, образующими кристаллическую структуру, особенно велико [Павлов, Хохлов, 2000].

**2. Примесная проводимость (200—600 °С).** Электропроводность в диэлектриках осуществляется в основном ионами примесей деполяризацией за счет дефектов кристаллической решетки.

**3. Собственная проводимость.** Электропроводность формируется за счет основных ионов кристаллической решетки (интервал более высоких температур).

На процесс проводимости в горных породах в общем случае накладывается по-

ляризация, обуславливаемая либо ориентацией диполей, либо смещением зарядов относительно друг друга. Поэтому на зависимостях  $\lg \rho = f(T)$  габбро и базальта в интервале температур 200—400 °С наблюдаются локальные максимумы электропроводности. Проводимость диэлектрика при переменном токе (так называемая активная удельная проводимость) складывается как из истинной омической проводимости, вызванной перемещением носителей заряда, так и из потерь энергии, связанных с дисперсией. Скорость распространения зондирующих диэлектрическую среду электромагнитных волн зависит только от ее относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), которая характеризует свойство вещества поляризовываться в электрическом поле. Поскольку поляризация представляет собой инерционный процесс, то для ее развития требуется определенное время. Количественно запаздывание становления поляризации характеризуется временем релаксации  $\tau$ , в течение которого поляризация спадает после прекращения действия поля.

Различают несколько видов поляризации, основными из которых являются:

- электронная, вызванная смещением в электрическом поле электронных оболочек атомов относительно атомных ядер и характерная для всех атомов ( $\tau \approx 10^{-14} \div 10^{-15}$  с);
- ионная, наблюдаемая в ионных кристаллах, обусловлена упругим смещением в электрическом поле разноименных ионов из их положений равновесия в противоположных друг относительно друга направлениях ( $\tau \approx 10^{-12} \div 10^{-13}$  с);
- атомная, обусловленная смещением атомов разного типа в молекуле под действием электрического поля ( $\tau \approx 10^{-12} \div 10^{-13}$  с);
- ориентационная, характерная для полярных диэлектриков (жидкостей и газов), состоящих из молекул с постоянными электрическими дипольными моментами, а также для кристаллов, в

которых дипольные моменты могут поворачиваться;

— релаксационная (тепловая), обычно наблюдаемая у ионных кристаллов, где слабосвязанные ионы могут иметь несколько равновесных положений, в которые они переходят скачкообразно. Для двух последних видов поляризации значения  $\tau$  лежат в очень широких пределах ( $\tau \approx 10^{-2}—10^{-12}$  с) и существенным образом зависят от температуры.

В переменных электромагнитных полях высоких частот, когда поляризация из-за свойственной ей инерционности начинает отставать от поляризующего поля, в токе смещения появляется компонента, сдвинутая по сравнению с поляризующим полем на  $90^\circ$ , которая по направлению совпадает с током проводимости [Аузин, Зацепин, 2015]. Поэтому повышение температуры увеличивает межатомные расстояния, вследствие чего связь между отдельными ионами ослабляется, взаимное смещение ионов под действием внешнего электрического поля облегчается, в результате диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов возрастает. Это подтверждается и зависимостями  $\epsilon = f(T)$ .

**Выводы.** Созданный экспериментальный комплекс для исследования электрических параметров образцов минералов и горных пород в широком диапазоне темпе-

ратур в нейтральной и кислородной среде позволяет исследовать образцы минерального вещества в низкочастотном спектре электромагнитных волн, что дает возможность получить необходимую новую информацию о природе происходящих процессов. При некоторой доработке этот комплекс будет использован для изучения электрических характеристик горных пород при одновременном воздействии давлений и температур, моделирующих термодинамические условия глубинных горизонтов земной коры. Основными факторами, влияющими на характер полученных зависимостей электрических параметров исследованных образцов, являются влажность, минеральный состав, содержание кислорода и температура. С увеличением частоты приложенного электрического поля значения электрических параметров образца уменьшаются, что свидетельствует о преобладании емкостной составляющей импеданса. Показано, что образование оксидов в кислородсодержащей среде увеличивает электрическое сопротивление. При повышении температуры диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов возрастает, что связано с ослаблением связи между отдельными ионами. Низкочастотная диэлектрическая проницаемость наиболее чувствительна к деформационным фазовым переходам.

### Список литературы

- Аузин А. А., Зацепин С. А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов георадиолокации). *Вестник ВГУ. Сер. геология*. 2015. № 4. С. 122—127.
- Гуфан Ю. М. Структурные фазовые переходы. Москва: Наука, 1982. 304 с.
- Жданов Г. С., Хунджуа А. Г. Лекции по физике твердого тела: Принципы строения, реальная структура, фазовые превращения. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 231 с.
- Корчин В. А., Буртный П. А., Коболев В. П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка, 2013. 303 с.
- Корчин В. А., Карнаухова Е. Е., Нех А. С., Кравчук М. В. Новые аппаратно-методические разработки исследования физических характеристик горных пород при высоком давлении и температуре: *Материалы 12-й Международной конф. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"*. Москва, 2011. С. 145—148.
- Кравчук М. В., Корчин В. А. Аппаратно-методические особенности исследования температурных изменений электрических параметров горных пород в инертной и окис-

лительной среде: *Материалы Междунар. науч.-практ. конф. "Современное состояние и актуальные направления геологического изучения и комплексного освоения ресурсов недр стран СНГ"*, 13—15 ноября, 2013. Минск, 2014. С. 90—93.

Кравчук М. В., Корчин В. А. Информативность исследования электрических свойств горных пород в инертной среде: *14<sup>th</sup> EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects 1 — Geoinformatics — an Innovative View of the Earth* (11 мая 2015).

Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела. Москва: Высшая школа, 2000. 494 с.

Пархоменко Э. И. Электрические свойства ми-

нералов и горных пород, В кн.: *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика)*. Под ред. Н. Б. Дортман. Москва: Наука, 1984. С. 261—269.

*Руководство по эксплуатации RLC-метра МНС-1100*. Киев, 2008. promix.com.ua.

Шепель С. И., Кравчук М. В. Глубинные изменения электрических параметров кристаллических пород и природа аномалий электропроводности в земной коре. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 3. С. 67—77.

Shanov S., Yanev Y., Lastovickova M., 2000. Temperature dependence of the electrical conductivity of granite and quartz-monzonite from south Bulgaria: geodynamic inferences. *J. Balkan Geophys. Soc.* 3(2), 13—19.

## A system of experimental studies of electric properties of rocks in the inert medium

© M. V. Kravchuk, V. A. Korchyn, V. P. Kobolev, N. I. Novik, 2018

In the work presented, the construction and the hardware-methodological features of the automated measuring system developed and realized at the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine designed to study electrical parameters of the mineral substance at temperatures up to 1100 °C in oxygen-containing and inert media are described in detail. The results of some experiments performed at the stage of experimental tests of the complex in the temperature range from room temperature to 700 °C are shown. The factors influencing the character of the obtained temperature-frequency dependences of the electrical parameters of the investigated samples are considered and analyzed. It is shown that the formation of oxides in an oxygen-containing medium increases the electrical resistance. The difference in the gradient of the change in  $\rho$  from the temperature, especially in the range 300—500 °C, is due to the fact that the electrical conductivity is carried out mainly by impurity ions and crystal lattice defects. As the temperature is raised, the dielectric constant of ionic crystals increases, which is due to the weakening of the bond between the individual ions. Low-frequency permittivity is the most sensitive to deformation phase transitions and is a more informative parameter, since it varies with a larger gradient.

**Key words:** *PT*-petrophysics, electric parameters, measuring complex, inert medium.

### References

Auzin A. A., Zatsepin S. A., 2015. About the dispersion of dielectric permeability of a geological environment (in connection with interpretation of GRP materials). *Vestnik VGU. Ser. geologiya* (4), 122—127 (in Russian).

Gufan Yu. M., 1982. Structural phase transitions. Moscow: Nauka, 304 p. (in Russian).

Zhdanov G. S., Khundzhua A. G., 1988. Lectures on solid state physics: Principles of structure

- re, real structure, phase transformations. Moscow: Publ. House Moscow University, 231 p. (in Russian).
- Korchin V.A., Burtnyy P.A., Kobolev V.P., 2013. Thermobaric Petrophysical Modeling in Geophysics. Kiev: Naukova dumka, 303 p. (in Russian).
- Korchin V.A., Karnaukhova Ye. Ye., Nekh A.S., Kravchuk M.V., 2011. New instrumentation and methodological development of the study of physical characteristics of rocks under high pressure and temperature: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference "Physical and Chemical and Petrophysical studies in the Earth sciences"*. Moscow, P. 145—148 (in Russian).
- Kravchuk M.V., Korchin V.A., 2014. Instrument-methodological features of studying the temperature changes in the electrical parameters of rocks in the inert and oxidizing environments: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Current state and current trends in geological study and integrated development of subsoil resources of the CIS countries"*, 13—15 November, 2013. Minsk, P. 90—93 (in Russian).
- Kravchuk M.V., Korchin V.A., 2015. Informativity of the study of electrical properties of rocks in an inert medium: *14<sup>th</sup> EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects 1 — Geoinformatics — an Innovative View of the Earth (May 11, 2015)*.
- Pavlov P.V., Khokhlov A.F., 2000. Solid State Physics. Moscow: Vysshaya shkola, 494 p. (in Russian).
- Parkhomenko E.I., 1984. Electrical properties of minerals and rocks. In: *Physical properties of rocks and minerals (petrophysics)*. Ed. N.B. Dortman. Moscow: Nauka, P. 261—269 (in Russian).
- Operating Instructions RLC-meter MNS-1100. Kyiv, 2008. promix.com.ua.
- Shepel S.I., Kravchuk M.V., 2007. Deep changes electrical parameters of crystalline rocks and the nature of the anomalies of electrical conductivity in the Earth's crust. *Geofizicheskiy zhurnal* 29 (3), 67—77 (in Russian).
- Shanov S., Yanev Y., Lastovickova M., 2000. Temperature dependence of the electrical conductivity of granite and quartz-monzonite from south Bulgaria: geodynamic inferences. *J. Balkan Geophys. Soc.* 3 (2), 13—19.

## Сучасні інформаційні технології в організації геофізичних досліджень

© Л. Г. Савків, Б. Т. Ладанівський, 2018

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,  
Львів, Україна

Надійшла 15 листопада 2017 р.

Рассмотрены характерные особенности проведения электромагнитных исследований на режимных геофизических станциях (РГС), а также в условиях полевых экспедиционных работ. Изложены современные подходы в организации геофизических исследований с использованием IT-технологий, в которых в общем предусматриваются автоматическая (полуавтоматическая) регистрация информационных сигналов, автоматизированный экспресс-анализ первичных данных на текущей точке наблюдений, автоматический сбор, прием—передача первичной информации через GSM-сети операторов мобильной связи, работа с данными в режиме online. Для реализации указанных подходов предложен набор основных инструментальных средств: FTP-сервер с настройками для работы с данными разных пользователей, комплекс серверного программного обеспечения LAMPP (ОС Linux, Apache, MySQL, PHP, Python), технологии HTML, CGI, SSI, JavaScript, DHTML, CSS. Эти средства испытывались при мониторинговых исследованиях на РГС "Ныжне Сэ-льщэ" (Закарпатская обл.), полевых испытаниях методом ЗСБ. Для оперативного анализа электромагнитных данных в поле проиллюстрирована на скриншотах работа программных модулей экспресс-оценки данных ЗСБ, разработанных под управлением ОС Windows. Такие модули можно использовать при любых изучениях и на территориях любой сложности или проблемности, где доступен мобильный Интернет, возможна работа в offline.

**Ключевые слова:** геофизические методы исследований, электромагнитные методы, автоматизированный экспресс-анализ, IT-технологии, Интернет-ресурсы, Web-службы, FTP-сервер.

**Вступ.** Для досліджень внутрішньої будови Землі використовують різні геофізичні методи. При цьому вивчають фізичні поля різної природи і походження.

Електрична розвідка (електророзвідка) має справу з електричними та електромагнітними полями [Толстой та ін., 2006]. Дослідження електромагнітними методами проводять у кількох напрямках:

- постійні вимірювання (робота режимних геофізичних станцій (РГС)) — для постійного моніторингу стану середовища;
- моніторингове вивчення — періодич-

ний моніторинг окремих територій чи районів;

- польові дослідження — зондування в окремих точках, профільне та площинне вивчення.

Електромагнітні методи геофізики застосовують для вирішення цілої низки складних і різнопланових завдань [Толстой та ін., 2006]. Так, електророзвідку застосовують під час пошуку і розвідки корисних копалин, вирішення інженерних і геологічних завдань, виявлення водоносних горизонтів, оцінювання екологічно-проблем-

них територій, досліджень забруднених чи зсувонебезпечних зон, обвалів, провалів, вивчення активності вулканів та ін. [Дешиця та ін., 2014; Дешиця та ін., 2016б; Ladanivskyu et al., 2017; Сапужак та ін., 2017].

Для того щоб мати вичерпні відомості, повніші й точніші дані у пункті спостережень, спеціалісти-геофізики намагаються зібрати якомога більше первинних даних, виконати повторні, а деколи і контрольні виміри. Мало того, задля якісного результату в процесі обробки чи інтерпретації таких даних доволі часто фахівці вдаються у своїй практиці до поєднання кількох геофізичних методів досліджень, і, отже, на досліджуваній території паралельно працює вже кілька бригад.

Унаслідок цього розширюється коло досліджуваних параметрів, значно зростають обсяги первинної інформації, а це, у свою чергу, суттєво підвищує надійність і достовірність результатів обробки.

Проте особливості нового підходу до проведення електророзвідувальних робіт диктують і нові вимоги до організації польових досліджень. Тому виникає неабияка потреба у розробці принципово нових методик як у веденні експедиційно-польових вимірювань, так і в процесі збирання—передавання даних, які б завжди гарантували оптимальну роботу в полі, максимально результативну й оперативну обробку та інтерпретацію результатів вимірів.

У статті описано головні засади нового підходу, проаналізовано набір інструментальних засобів, викладено основні принципи розробленої системи з відповідною інфраструктурою для оперативного вирішення різних геофізичних завдань способами і методами електророзвідки від етапу збору первинних геофізичних даних до етапу обробки чи інтерпретації.

**Постановка задачі.** Електричні методи розвідки придатні для розв'язку різноманітних геофізичних задач. Дослідження електричних чи електромагнітних полів можна проводити у режимі постійних моніторингових спостережень з метою ви-

вчення динаміки змін параметрів середовища з часом, а також у режимі нетривалих періодичних зондувань регіонального масштабу. При цьому геофізичні вимірювання часто ведуться як на окремих, наперед визначених пунктах спостережень, наприклад на РГС, так і на значних площах чи проблемних територіях.

Для геофізичних вимірювань на РГС характерні такі особливості: однотипність вимірів, постійність використовуваних методик, незмінність складу апаратури. Основні вимоги до роботи зазначених станцій на сьогодні — безперервна автоматична реєстрація тих чи інших параметрів поля, повний доступ до даних у режимі online.

Значно складнішою є ситуація з проведенням польових геофізичних досліджень, що пов'язано з низкою вагомих причин. Передусім зауважимо, що електророзвідка як один з методів досліджень має чи не найбільше модифікацій, тому для вивчення певного району або території можуть послуговуватися не одним єдиним методом електророзвідки, а двома-трьома. Крім того, для більшої інформативності результатів досліджень часто вдаються до поєднання різних геофізичних методів [Толстой та ін., 2006; Максимчук та ін., 2016].

До прикладу, при виконанні польових геофізичних досліджень спеціалісти Карпатського відділення (КВ ІГФ) Інституту геофізики НАН України використовують у своїй практиці методи не лише електророзвідки (ПЕП, ЗСБ, МТЗ, ПЕМПЗ), а й магніторозвідки, сейсморозвідки. За певних умов згадані методи часто комбінують. При цьому для вимірювань застосовують найрізноманітніші прилади та апаратуру [Максимчук, Сапужак, 2011; Дешиця та ін., 2014; Максимчук та ін., 2016]. Так, для приповерхневих досліджень використовують прилад "Стадія", глибинних — прилад "Імпульс", а також РХІНДС, магнітометри, станцію МТЗ та ін.

Під час проведення подібних робіт значно ускладнюється вимірювальний процес, оскільки на пунктах спостережень для різних методик розгортають різні схеми установок, застосовують різне технологіч-

не обладнання, залучають різні групи спеціалістів. Як наслідок, отримуємо різні за типом і природою дані досліджень, великі обсяги первинної інформації.

Слід також зазначити, що на швидкість та якість проведення польових вимірювань, крім іншого, впливають і погодні умови, і географія місцевості, і кліматичні особливості. Немаловажними є оптимальна організація робіт, швидка й оперативна обробка та аналіз даних.

Реалії сьогодення диктують свої вимоги до виконання експедиційних досліджень, а саме:

- 1) автоматична або напівавтоматична реєстрація інформаційних сигналів;
- 2) автоматизований експрес-аналіз первинних даних на поточній точці спостережень;
- 3) приблизна (попередня) обробка (інтерпретація) результатів ще на етапі самих вимірювань.

У польових умовах, коли всі і все працюють у режимі суворої економії наявних ресурсів, будь-яка комп'ютерна обробка даних неможлива: польова бригада здебільшого зосереджена на вимірах, а коли досліджують значні території чи площі — виключно лише на вимірах, і тому отриману інформацію не обробляють. У подібних ситуаціях доречно забезпечити збір і передачу даних для подальшої обробки на окремий сервер.

З огляду на викладене вище, сформульовано сучасні підходи до організації електромагнітних досліджень:

- 1) автоматична або напівавтоматична реєстрація інформаційних сигналів;
- 2) автоматичне збирання — передавання первинної інформації;
- 3) робота з даними в режимі online.

**Методологія.** Забезпечити описані вище принципи можна, використавши у практиці сучасне геофізичне обладнання у поєднанні з новітніми інформаційними технологіями.

На сьогодні вся вимірювальна апаратура, яка побудована на високотехнологічній електронній базі, є цифровою. Доволі часто такі прилади забезпечують ав-

томатичну реєстрацію сигналів, зберігають файли з даними у внутрішній пам'яті, обладнані USB /COM (інтерфейс обміну RS-232)-портами для подальших маніпуляцій з даними. Тому, використовуючи такі прилади, завжди матимемо і автоматичну реєстрацію сигналів, і автоматичний збір первинної інформації. Складнішою є ситуація щодо передачі даних.

Як зазначено вище, в польових умовах з міркувань економії ресурсів для попереднього аналізу чи обробки пакети даних пропонувалося передавати на окремий сервер. Така передача можлива лише за наявності доступу до Інтернету.

Якщо геофізичні дослідження проводять у районах населених пунктів чи територій, де доступними є Wi-Fi-мережі, з портативного ПК з активною функцією Wi-Fi пакети даних передавати можна. Проте не завжди є точки доступу Wi-Fi. І найважливіше: доволі часто геофізичні спостереження ведуться у глухих, важкодоступних віддалених районах. За таких умов для передачі даних найоптимальніше використовувати мобільний Інтернет, який на сьогодні досяжний практично у будь-якій точці нашої країни. Тому в польових умовах для геофізичних досліджень слід задіювати вимірювальну апаратуру, яка має вбудовані функції передачі даних через GSM-мережі операторів мобільного зв'язку або обладнана USB /COM-портами для зовнішнього під'єднання незалежних модулів передачі [Підвірний, 2013; Дециця та ін., 2014; Дециця та ін., 2016а; Львівський центр Інституту космічних досліджень, веб-сайт].

Доступ до даних у режимі online забезпечує низка Інтернет-сервісів і служб. Про усі можливі Web- та Інтернет-технології, які можуть бути задіяні в роботі з геофізичною інформацією, доволі вичерпно і повно викладено у публікаціях [Савків, 2017; Савків, Ладанівський, 2017].

Рекомендований набір основних інструментальних засобів такий:

1. FTP-сервер, налаштований і сконфігурований на постійне приймання пакетів даних різних геофізичних методів.

2. Комплекс серверного програмного забезпечення LAMP:

- операційна система (ОС) Linux;
- Web-сервер Apache;
- СУБД MySQL;
- скриптові мови та інтерпретатори: PHP, Python.

3. Технології: HTML, CGI, SSI, JavaScript, DHTML, CSS.

Роботу з геофізичними даними, що зберігаються на FTP-сервері, можна організувати через звичайну HTML-сторінку з компактним відображенням усієї корисної інформації або через окремий повноцінний Web-сайт зі зручним інтерфейсом користувача.

На HTML-сторінках доречно відображувати таку довідкову інформацію:

- карта території дослідження;
- геологічна характеристика місцевості;
- погода та показники її стану;
- специфічні особливості району чи області;
- інше.

Не зайвим буде розміщення опису методів досліджень, схем установок, вимірювальних приладів та апаратури, їх технічних параметрів і частот вимірів, робочих діапазонів чи інших характеристик. Найважливішим елементом є графічне зображення наявних на FTP-сервері даних. Побудовані графіки мають бути максимально інформативними, а при виборі інструментів для побудови рисунків слід брати до уваги і можливість створення зображень з різною роздільною здатністю, різного розміру. У графіках можливе використання додаткових шкал, полярних координат, лінійного, логарифмічного чи білогарифмічного масштабу.

Слід також зазначити, що інформаційний матеріал на HTML-сторінках бажано подавати у зручній для сприйняття людини формі, тобто у вигляді фотографій, коротких і лаконічних текстових описів, таблиць, графічних схем, діаграм, схематичних зображень, розмаїтих графіків. Розроблені сторінки мають надавати користувачу максимум інформації, бути "легкими" і не потребувати багато часу на за-

вантаження в браузері локальної машини на стороні клієнта.

**Результат.** Запропоновані підходи до організації геофізичних спостережень були запроваджені у кількох напрямках. Випробувано два варіанти — постійні моніторингові дослідження і польові дослідження.

У варіанті постійних моніторингових досліджень для перевірки і тестування описаної методики обрано РГС "Нижнє Селище" (Закарпатська обл.) [Савків, 2016б]. На цій станції ведуться безперервні спостереження природного електричного поля (ПЕП) у двох напрямках: північ—південь; захід—схід.

Згідно з описаними вище особливостями та рекомендаціями щодо організації роботи РГС, для своїх потреб ми використали прилад з автоматичною реєстрацією, збором і передачею даних через мережу GSM [Підвірний, 2013].

Для доступу до геофізичної інформації в режимі реального масштабу часу задіяли FTP-сервер vsftpd. Сервер налаштували на приймання даних з конкретної станції, їх зберігання у чітко визначеному місці, строгу систематизацію, повний/частковий доступ.

На РГС "Нижнє Селище" вимірювальна геофізична апаратура реєструє два масиви каналних напруг, формує протягом доби файл з цими первинними даними і наприкінці поточної доби автоматично відсилає на FTP-сервер.

На стороні сервера в середовищі FTP для приймання цих даних, а також для роботи з будь-якими іншими надісланими моніторинговими даними в режимі online сформовано відповідну інфраструктуру та розроблено певну систему користувачів. Тут для кожної РГС, що надсилатиме свої дані, виділені необхідні інформаційні ресурси і сформована група користувачів. Такими ресурсами можуть бути одна чи декілька директорій (їх кількість залежить від вирішуваних завдань), які прописуються у відповідних конфігураційних файлах і стають домашніми для конкретної групи користувачів. Група користувачів, як правило, предтавлена:



- 1) одним користувачем — має обмежені права, від його імені дані з FTP можна лише зчитати;
- 2) другим користувачем — має максимальні права на доступ, від його імені можна записувати дані на FTP, редагувати, знищувати.

З міркувань безпеки на FTP всі користувачі системи є віртуальними, доступ до ресурсів FTP авторизований (кожен користувач має свій логін і пароль), вся службова інформація про користувачів зберігається в окремій базі даних СУБД MySQL.

Розроблений макет HTML-сторінки містить такі відомості і дані:

- фото РГС "Нижнє Селище";
- розташування РГС на географічній карті;
- схема установки;
- стислий опис технічних параметрів і характеристик вимірювальної апаратури;
- графіки залежностей (рис. 1).

Отже, коротко організацію роботи постійних моніторингових досліджень на прикладі згаданої РГС можна описати у такий спосіб:

- на передавальній стороні (де безпосередньо проводять виміри) з використанням належного обладнання безперервно та автоматично відбуваються реєстрація, збір і передача первинних даних на сервер;
- на приймальній стороні запущено і постійно працюють: FTP-сервер, Web-сервер, сервер БД, інші Інтернет-служби і сервіси, що в сукупності забезпечують роботу з геофізичними даними в режимі реального масштабу часу.

За описаною методикою розроблену систему випробувано, вона працює в КВ ІГФ НАН України.

У польових дослідженнях цю методику можна застосовувати, якщо геофізична апаратура забезпечує автоматичну/напівавтоматичну реєстрацію сигналів, пе-

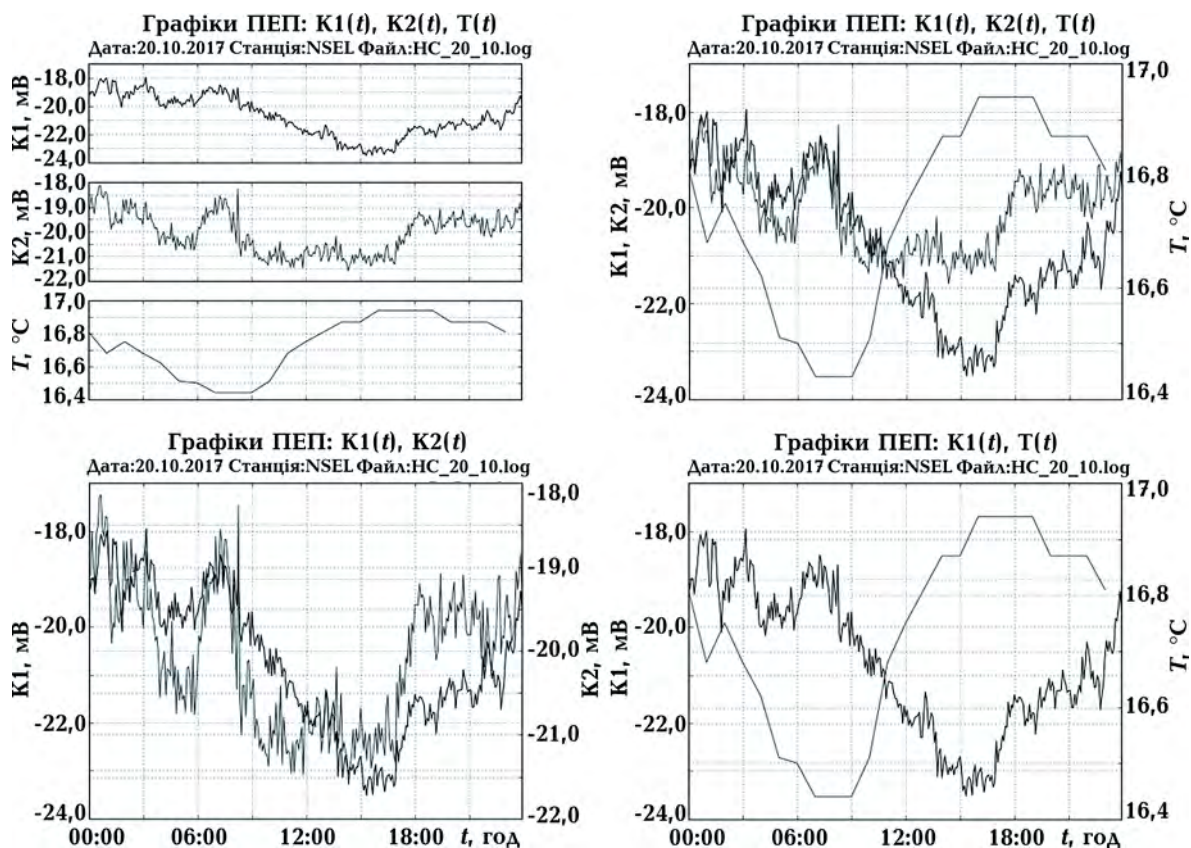


Рис. 1. Графіки ПЕП за даними з РГС "Нижнє Селище".

редає дані через GSM-мережі або обладнана USB/COM-портами, через які можна було б під'єднувати незалежні модулі передачі [Підвірний, 2013; Дещиця та ін., 2014; Дещиця та ін., 2016а].

На сьогодні у напівавтоматичному режимі в Карпатському відділенні працює станція МТЗ, в якій зареєстровані сигнали записують на SD-карту пам'яті, та прилад РХІНДС, де зареєстровані імпульси зберігаються у внутрішній пам'яті приладу. Передати дані цих приладів на FTP можна за допомогою портативного ПК.

На FTP-сервері для роботи з польовими даними також організовано відповідну інфраструктуру, розроблено свою систему користувачів, виділено окремі директорії для приймання і зберігання геофізичної інформації, надано певні права доступу усім користувачам.

З огляду на те, що в польових умовах з урахуванням зайнятості груп спеціалі-

тів та з міркувань економії ресурсів і часу будь-яку комп'ютерну обробку даних проводити недоречно, найоптимальнішою є обробка даних на стороні сервера, а на портативному ПК — лише аналіз результатів цієї обробки у вигляді окремих графіків, діаграм, зображень.

Прототипами таких серверних програм обробок можуть бути ці робочі програмні модулі, що розроблені та працюють під управлінням ОС Windows і призначені для оперативного аналізу даних електророзвідки в полі. Нижче наведено їх короткий опис.

1. Програма візуалізації первинних геофізичних даних методу ЗСБ [Савків, Ладанівський, 2016] (рис. 2) — надає повну інформацію про проведені польові спостереження по усіх пікетах конкретного профілю (карта польових робіт зі схематичним розташуванням пікетів на профілі, список пікетів), дає змогу наочно бачи-



Рис. 2. Скриншот програми візуалізації первинних геофізичних даних методу ЗСБ (головне вікно (форма) програми).

ти всі масиви зареєстрованих значень, візуально оцінювати характер перехідних процесів та оперативно аналізувати вигляд кривих зондувань.

2. Програма експрес-оцінювання даних ЗСБ на поточній точці спостережень [Савків, 2016а] (рис. 3) — надає максимум інформації на конкретному пікеті: тип вимірювальної установки, прилад, дата проведення вимірів, номер об'єкта, профілю, пікету, географічні координати точки, розміри генераторної та приймальної петель, зареєстровані значення сигналів. За даними перехідних процесів будують криві становлення електромагнітного поля у лінійному та білогарифмічному масштабах. Це дає змогу на поточній точці спостережень оперативно оцінювати та аналізувати результат зондувань, а за характером кривої становлення у білогарифмічному масштабі у першому наближенні робити висновок щодо ймовірного розчленуван-

ня геоелектричного розрізу на окремі горизонти.

За такого підходу можна суттєво зекономити ресурси в полі, а на підставі результатів попередньої обробки геофізичних даних — грамотно зорганізувати подальшу роботу польової бригади та оперативно спланувати необхідні виміри.

За відсутності мобільного Інтернету можлива робота в режимі offline. Для цього на портативному ПК потрібно встановити і відповідним чином налаштувати сервер, а усі подальші звернення мають відбуватися виключно через localhost (IP 127.0.0.1).

Описану методику цілком відлагоджено, перевірено і протестовано в лабораторних умовах. Працює коректно.

**Висновки та обговорення.** В результаті проведеної роботи запропоновано сучасні підходи до організації геофізичних досліджень з використанням ІТ-технологій, підібрано оптимальний набір інстру-

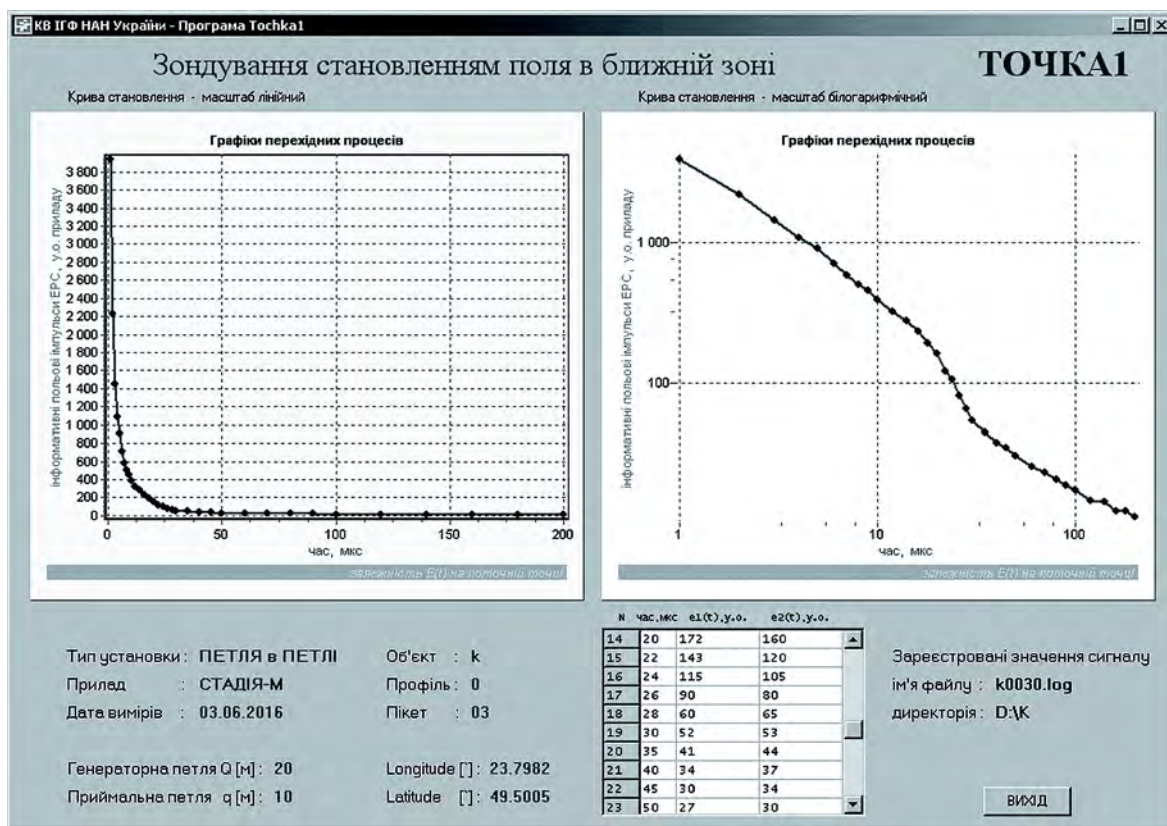


Рис. 3. Скриншот програми експрес-оцінки даних ЗСБ на поточній точці спостережень (головне вікно (форма) програми).

ментальних засобів Інтернет- та Web-ресурсів і на їх базі розроблено систему з відповідною інфраструктурою для оперативного вирішення різних геофізичних завдань засобами і методами електророзвідки. Запропоновані підходи забезпечують автоматичний збір даних, приймання — передавання, експрес-аналіз експериментальних польових даних, а також роботу з будь-якою геофізичною інформацією в режимі online.

Досліджено два варіанти: моніторинг на РГС "Нижнє Селище" (Закарпатська обл.); польові роботи за методом ЗСБ.

Розроблену систему відлагоджено, описану методіку можна застосовувати:

- на будь-якій РГС за постійних моніторингових досліджень, де з технічних причин доступний лише мобільний Інтернет;

- для будь-яких досліджень — за додаткових налаштувань на портативному ПК у режимі offline;
- під час будь-яких геофізичних досліджень, де існує найменша загроза чи небезпека для життя людини: вимірювання на забруднених територіях, екологічно проблемних зонах, у районах карстових провалів, зсувів, обвалів, відпрацьованих шахт і тощо;
- у польових умовах, де використання портативного ПК обмежене або зведене до мінімуму;
- під час важливих тривалих моніторингових досліджень, що проводять в екстремальних умовах без участі людини, де є велика ймовірність втрати, пошкодження чи руйнування геофізичної апаратури (до прикладу, вивчення активності вулканів, землетрусів).

### Список літератури

Дециця С. А., Підвірний О. І., Романюк О. І., Савків Л. Г. Технологічний комплекс та результати електромагнітного моніторингу екологічно проблемних об'єктів Передкарпаття. *Геодинаміка*. 2014. № 1 (16). С. 114—128.

Дециця С. А., Підвірний О. І., Романюк О. І., Саговий Ю. В., Коляденко В. В., Савків Л. Г., Мицишин Ю. С. Оцінка стану екологічно проблемних об'єктів Калуського гірничо-промислового району електромагнітними методами та їх моніторинг. *Наука та інновації*. 2016 а. Т. 12. № 5. С. 47—59.

Дециця С. А., Романюк О. І., Підвірний О. І., Коляденко В. В., Сапужак О. Я. Електрометричні спостереження на екологічно проблемних територіях Заходу України: *Матеріали VI Міжнар. наук. конф. "Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища" до 25-річчя Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України та 85-річчя професора Ярослава Сапужака, першого керівника КВ ІГФ НАН України, Львів, 20—23 вересня 2016 р.* Львів: Сполом, 2016 б. С. 59—61.

Львівський центр Інституту космічних до-

сліджень (ЛЦ ІКД) [Електронний ресурс]. [http://www.isr.lviv.ua/index\\_ua.htm](http://www.isr.lviv.ua/index_ua.htm). [http://www.isr.lviv.ua/products\\_ua.htm](http://www.isr.lviv.ua/products_ua.htm) (дата звернення 01.11.2017).

Максимчук В. Ю., Козицький С. З., Кудеравець Р. С., Чоботок І. О., Романюк О. І., Дециця С. А., Сапужак О. Я. Результати магнітних та електророзвідувальних досліджень на Крехівському газовому родовищі: *Матеріали VI Міжнародної наукової конференції "Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища" до 25-річчя Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України та 85-річчя професора Ярослава Сапужака, першого керівника КВ ІГФ НАН України, Львів, 20—23 вересня 2016 р.* Львів: Сполом, 2016. С. 172—174.

Максимчук В. Ю., Сапужак О. Я. 20-річчя Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України. *Геодинаміка*. 2011. № 2 (11). С. 7—10.

Підвірний О. І. До питання збору і передачі первинних геофізичних даних в автоматизованих системах. *Геодинаміка*. 2013. № 2 (15). С. 286—288.

- Савків Л. Г. Експрес-оцінка даних ЗСБ на поточній точці спостережень: *Матеріали VI Міжнар. наук. конф. "Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища" до 25-річчя Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України та 85-річчя професора Ярослава Сапужака, першого керівника КВ ІГФ НАН України, Львів, 20—23 вересня 2016 р.* Львів: Сполом, 2016 а. С. 244—246.
- Савків Л. Г. Система дистанційного прийому—передачі даних геофізичних спостережень. *Геоінформатика*. 2016 б. № 2. С. 59—67.
- Савків Л. Г. Internet-сервіси для графічного представлення даних геофізичних спостережень в режимі реального масштабу часу: *Матеріали наук. конф.-семінару "Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах", присвяченої пам'яті Т. З. Вербицького та Ю. Т. Вербицького, Верхнє Синьовидне, 1—2 червня 2017 р.* Львів: Сполом, 2017. С. 81—84.
- Савків Л. Г., Ладанівський Б. Т. Застосування Web-технологій для візуалізації геофізичних даних в режимі on-line: *Матеріали III Міжнар. наук. конф. "Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем", присвяченої пам'яті видатним українським вченим у галузі електромагнітних досліджень: доктору фіз.-мат. наук В. М. Шуману, доктору геол. наук С. М. Куліку, Київ, 3—5 жовтня 2017 р.* Київ: Талком, 2017. С. 91—93.
- Савків Л. Г., Ладанівський Б. Т. Модуль візуалізації первинних геофізичних даних. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2016. № 843. С. 65—73.
- Сапужак О. Я., Романюк О. І., Ладанівський Б. Т., Піввірний О. І., Коляденко В. В., Дециця С. А., Климкович Б. Я., Сирожко О. В. Електророзвідувальні дослідження карстових явищ на території Бартатівського навчально-виховного комплексу (Львівська область): *Матеріали III Міжнар. наук. конф. "Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем", присвяченої пам'яті видатним українським вченим у галузі електромагнітних досліджень: доктору фіз.-мат. наук В. М. Шуману, доктору геол. наук С. М. Куліку, Київ, 3—5 жовтня 2017 р.* Київ: Талком, 2017. С. 95—96.
- Толстой М. І., Гожик А. П., Рева М. В., Степанюк В. П., Сухорага А. В. Основи геофізики (методи розвідувальної геофізики): Підручник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2006. 446 с.
- Ladanivskyy B., Zlotnicki J., Reniva P., Alanis P., 2017. Electromagnetic signals on active volcanoes: Analysis of electrical resistivity and transfer functions at Taal volcano (Philippines) related to the 2010 seismovolcanic crisis. *J. Appl. Geophys.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.033>.

## Modern information technologies in organization of geophysical studies

© L. G. Savkiv, B. T. Ladanivskyy, 2018

The features of geo-electrical surveying on permanent geophysical stations and in field conditions are described in this article. Modern approaches to geophysical study with IT-technology application, which require an automatic or semiautomatic data recording, express analysis of current experimental results, in a on-line or off-line mode, automatic data acquisition and transmission by GSM net are represented. Described approaches are realized using ftp-server with appropriate settings on a base of standard server's tools i. e. LAMPP (Linux, Apache, MySQL, PHP, Python) and web techniques: HTML, CGI, SSI, JavaScript, DHTML, CSS. The described approaches were tested on the permanent geophysical station "Nyzhne Selyshche" (Zakarpatska oblast) for a natural electrical field variations monitoring study and during in field study of the shallow layers resistivity by the transient electromagnetic method (TEM). The express analysis of

experimental TEM data is shown and illustrated by screenshots demonstrating the operation of program modules developed and handled by OS Windows. Such application can also be used for any other data as where the mobile Internet is available as well as the Off-line mode is possible too.

**Key words:** geophysical methods, electromagnetic methods, express-analysis, IT-technology, Internet-resources, Web-services, FTP-server.

## References

- Deshchytsja S.A., Pidvirnyj O. I., Romanjuk O.I., Savkiv L. G.*, 2014. Electromagnetic monitoring of environmentally problematic objects in Precarpathians: results and technological means used. *Geodynamika* (1), 114—128 (in Ukrainian).
- Deshchycja S.A., Pidvirnyj O.I., Romanjuk O.I., Sadovyj Ju. V., Koljadenko V. V., Savkiv L. G., Myshhyshyn Ju. S.*, 2016a. Evaluation of the state of the ecologically problematic mining and industrial objects in Kalush region by electromagnetic methods and their monitoring. *Nauka ta innovatsiyi* 12 (5), 47—59 (in Ukrainian). doi: <http://dx.doi.org/10.15407/scin12.05.047>.
- Deshchycja S.A., Romanjuk O.I., Pidvirnyj O.I., Koljadenko V. V., Sapuzhak O. Ja.*, 2016b. Electromagnetic observations on ecologically problematic areas of western Ukraine: *Proceedings of the VI International Scientific Conference "Geophysical Technologies of Geological Media Predicting and Monitoring" dedicated to the 25<sup>th</sup> Anniversary of the Carpathian Branch of S.I. Subbotin's Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine and in memory of the 85<sup>th</sup> Anniversary of Professor Yaroslav Sapuzhak, the first head of the CB IGPH NAS Ukraine, Lviv, September 20—23, 2016*. Lviv: Spolom, P. 59—61 (in Ukrainian).
- Lviv Center of Institute for Space Research (LCI) [Electronic resource]. [http://www.isr.lviv.ua/in dex \\_ua.htm](http://www.isr.lviv.ua/in dex _ua.htm). [http://www.isr.lviv.ua/prod ucts \\_ua.htm](http://www.isr.lviv.ua/prod ucts _ua.htm). (application date 01.11.2017).
- Maksymchuk V. Ju., Kozyc'kyj S.Z., Kuderavec' R.S., Chobotok I.O., Romanjuk O.I., Deshchycja S.A., Sapuzhak O. Ja.*, 2016. Results of magnetic and electrical studies on Krechiv gas field: *Proceedings of the VI International Scientific Conference "Geophysical Technologies of Geological Media Predicting and Monitoring" dedicated to the 25<sup>th</sup> Anniversary of the Carpathian Branch of S. I. Subbotin's Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine and in memory of the 85<sup>th</sup> Anniversary of Professor Yaroslav Sapuzhak, the first head of the CB IGPH NAS Ukraine, Lviv, September 20—23, 2016*. Lviv: Spolom, P. 172—174 (in Ukrainian).
- Maksymchuk V. Ju., Sapuzhak O. Ja.*, 2011. 20<sup>th</sup> Anniversary of the Carpathian Branch S.I. Subbotin's Institute of Geophysics, Ukrainian National Academy of Sciences. *Geodynamika* (2), 7—10 (in Ukrainian).
- Pidvirnyj O. I.*, 2013. On acquiring and transmission of primary geophysical data in automated data systems. *Geodynamika* (2), 286—288 (in Ukrainian).
- Savkiv L. G.*, 2016a. Express in situ estimation of TEM data quality: *Proceedings of the VI International Scientific Conference "Geophysical Technologies of Geological Media Predicting and Monitoring" dedicated to the 25<sup>th</sup> Anniversary of the Carpathian Branch of S.I. Subbotin's Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine and in memory of the 85<sup>th</sup> Anniversary of Professor Yaroslav Sapuzhak the first head of the CB IGPH NAS Ukraine, Lviv, September 20—23, 2016*. Lviv: Spolom, P. 244—246 (in Ukrainian).
- Savkiv L. G.*, 2016b. The remote transfer system for acquired geophysical data. *Geoinformatyka* (2), 59—67 (in Ukrainian).
- Savkiv L. G.*, 2017. Internet-services for graphic representation of geophysical observations in real time mode: *Proceedings of the scientific conference-seminar "Seismological and geophysical studies in seismically active regions" dedicated to the memory of T. Z. Verbytskyj and Ju. T. Verbytskyj, Verhnje Synovydne, June 1—2, 2017*. Lviv: Spolom, P. 81—84 (in Ukrainian).
- Savkiv L. G., Ladanivs'kyj B. T.*, 2017. Web-tech-

- nology applications for on-line visualization of geophysical data: *Materials of the III International Scientific Conference "Actual Problems of Geomedium and Sounding Systems"*, devoted to memory of outstanding Ukrainian scientists in electromagnetic research: Vladimir N. Shuman, Sergey N. Kulik, Kyiv, October 3—5, 2017. Kyiv: Talkom, P. 91—93 (in Ukrainian).
- Savkiv L. G., Ladanivs'kyj B. T., 2016. Module for visualization of primary geophysical data. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika"*. *Kompyuterni nauky ta informatsiyni tekhnolohiyi* (843), 65—73 (in Ukrainian).
- Sapuzhak O. Ja., Romanjuk O. I., Ladanivs'kyj B. T., Pidvirnyj O. I., Koljadenko V. V., Deshhycja S. A., Klymkovych B. Ja., Syrojezhko O. V., 2017. The Electroprospecting study of karst phenomena on the Bartativ school area (Lviv region): *Materials of the III International Scientific Conference "Actual Problems of Geomedium and Sounding Systems"*, devoted to memory of outstanding Ukrainian scientists in electromagnetic research: Vladimir N. Shuman, Sergey N. Kulik, Kyiv, October 3—5, 2017. Kyiv: Talkom, P. 95—96 (in Ukrainian).
- Tolstoj M. I., Gozhyk A. P., Reva M. V., Stepanjuk V. P., Suhorada A. V., 2006. Fundamentals of Geophysics (geophysical exploration methods): Textbook. Kyiv: Vydavnycho-polihrafichnyy tsentr "Kyyvskyy universytet", 446 p. (in Ukrainian).
- Ladanivskyy B., Zlotnicki J., Reniva P., Alanis P., 2017. Electromagnetic signals on active volcanoes: Analysis of electrical resistivity and transfer functions at Taal volcano (Philippines) related to the 2010 seismovolcanic crisis. *J. Appl. Geophys.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.033>.

## Вікові варіації геомагнітного поля на літосферних плитах Землі

© П. В. Сумарук, Т. П. Сумарук, 2018

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,  
Київ, Україна

Надійшла 15 жовтня 2017 р.

Исследована зависимость величины знака вековых вариаций геомагнитного поля, очищенных от 3- и 11-летних составляющих, от положения обсерваторий на тектонических плитах. Для исследования были выбраны обсерватории, имеющие длинные ряды наблюдений. Показано, что вековые вариации содержат компоненты от внутренних и внешних источников, величина которых изменяется от плиты к плите и даже в пределах одной плиты. В регионах с интенсивными тектоническими процессами вековые вариации имеют большую амплитуду. Выделено 10 регионов, в которых эти вариации имеют особый характер изменений. Вариации могут быть противофазными на разных тектонических плитах, однако экстремумы кривых часовых изменений и смена знака вариаций в большинстве случаев совпадают с максимумами или минимумами солнечной и геомагнитной активностей. Сделано предположение что внутренние и внешние источники вековых вариаций геомагнитного поля взаимосвязаны. Внешние источники играют важную роль в генерации вариаций. Максимальные амплитуды вековых вариаций за весь период экспериментальных наблюдений установлены в двух регионах: первый — восточная часть Северо-Американской плиты, Карибская плита и северная часть Южно-Американской плиты, второй — западная часть Индийского океана. Величина компоненты вековых вариаций от внешних источников зависит от геомагнитной широты места наблюдения. Амплитуда этой компоненты увеличивается с увеличением широты обсерватории. Максимальные значения компонент вековых вариаций от внешних источников наблюдаются на магнитных и геомагнитных полюсах. Влияние внешних источников на величину вариаций наблюдается на обсерваториях, находящихся под экваториальной ионосферной электроструей. Основная закономерность общей картины вековых вариаций геомагнитного поля в данное время — уменьшение напряженности поля в большинстве регионов Земли. Во второй половине 20 в. регулярное небольшое увеличение поля наблюдалось только на европейской части Евразийской плиты.

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, вековые вариации, внешние источники, литосферные плиты.

**Вступ.** Магнітне поле Землі неперервно змінюється як з часом, так і в просторі. Варіації геомагнітного поля мають і внутрішні, і зовнішні джерела. Одними з найінформативніших варіацій є вікові. Вікові варіації (ВВ) — важливий інструмент під час дослідження природи і динаміки головного магнітного поля Землі. Дуже важ-

ливо розділити ВВ на складові від окремих джерел. Вікові варіації від зовнішніх джерел мають короткоперіодні і довгоперіодні компоненти. Короткоперіодні компоненти можна виключити, згладжуючи часові ряди кривих змін ВВ біжними середніми з вікнами відповідного періоду. Довгоперіодні ВВ від зовнішніх джерел



таким методом відфільтрувати у певний час не можна, оскільки довжина рядів ВВ не перевищує 200 років.

Експериментальні дані показують наявність глобальних, регіональних та локальних джерел ВВ, активність яких змінюється з часом. Локальні джерела ВВ можна виділити, якщо сітка пунктів вікового ходу є густою, а положення регіональних джерел — якщо припустити, що вони генерують однакові в часі ВВ.

Аналітичне зображення ВВ на основі теорії потенціалу було виконано тільки в ХХ ст. Це пов'язано з тим, що ряди сферичних функцій, які представляють потенціал ВВ, повільно сходяться [Калінін, 1984]. Повільна збіжність сферичних функцій для потенціалу ВВ, тобто вплив вищих гармонік, зумовлена локальністю деякої частини внутрішніх джерел та впливом зовнішніх джерел. Для аналітичного зображення як внутрішні джерела вибирають диполі з різними за величиною моментами та орієнтацією в просторі. Диполі поміщають на різні глибини. Комбінацією таких диполів добиваються найліпшого збігу результуючого поля із спостережуваним [Касьяненко и др., 2002; Бондар и др., 2006; Демина и др., 2008а]. За таким самим методом можна представити і головне магнітне поле Землі [Демина, Феофанова, 2004; Демина и др., 2008б].

Вікові варіації зображують у вигляді карти ізоліній для певної епохи. Такі карти необхідно будувати для кожної епохи, оскільки локальні та регіональні змінні джерела ВВ неперервно змінюють світову картину ізоліній ВВ.

В ХХ ст. нагромаджено велику кількість даних щодо абсолютних значень елементів геомагнітного поля. Це дає змогу прослідкувати за конкретними експериментальними даними зміну ВВ у просторі і в часі. Просторовий розподіл ВВ за даними магнітних обсерваторій вивчати важко, оскільки магнітні обсерваторії розміщені нерівномірно на земній поверхні. Завдяки появі наприкінці ХХ ст. супутникових даних щодо зміни компонент геомагнітного поля у ближньому (в межах маг-

нітосфери) та далекому космосі (у сонячному вітрі) побудовано точнішу світову карту розподілу ізопор ВВ для цього проміжку часу та виключено з ВВ частину, генеровану зовнішніми джерелами [Langel, Estes, 1985; Golovkov et al., 1997; Olsen, 2002; Verbanac et al., 2007; Шевнин и др., 2009, Finlay et al., 2016].

Вікові варіації вираховують як різницю між послідовними середньорічними значеннями повної напруженості геомагнітного поля та його компонент. Припускають, що усереднення даних за рік повністю виключає частину іррегулярних варіацій, пов'язану із зовнішніми джерелами, оскільки ці варіації є різнознаковими. Однак, як показано у статтях [Sumaruk, 2000; Verbanac et al., 2007; Шевнин и др., 2009, Сумарук, Сумарук, 2013], в отриманих таким методом ВВ наявна компонента пов'язана із квазідворічними, 11-річними та іншими довгоперіодними варіаціями сонячної активності. Виключити її можна, як указано вище, згладжуванням біжними середніми відповідного періоду. Очищені таким методом ВВ містять компоненти від внутрішніх глобальних, регіональних джерел, а також складові від джерел зовнішнього походження, які змінюються з періодами більше як 11-річні. Точність спостережень варіацій поля в ХІХ і першій половині ХХ ст. була невеликою і абсолютні похибки вимірів поля були співмірними з величинами ВВ.

У другій половині ХХ ст., з появою протонних, феромагнітних та інших магнітометрів, стало можливим вимірювати значення поля до десятих часток нанотесла, і це дало змогу вичислити ВВ з такою самою точністю. Водночас розпочалися вимірювання магнітних полів і плазми на Сонці, у сонячному вітрі і всередині магнітосфери. Таким чином, були одержані перші експериментальні дані щодо зовнішніх джерел варіацій геомагнітного поля. Часові ряди таких даних (близько 50 років) ще коротші, ніж ряди ВВ, визначених за даними магнітних обсерваторій, однак за ними досить надійно ідентифікують зовнішні джерела варіацій геомаг-

нітного поля та їх зв'язок із сонячною активністю. Спостереження за сонячною активністю ведуть від 1749 р. [Витинский, 1973], тому оцінити геомагнітну активність також можна починаючи з цього року. Це дає змогу виділити ВВ від зовнішніх джерел на інтервалі часу в якому велись спостереження геомагнітних варіацій. Найскладнішою проблемою є розділення регіональної та глобальної компоненти ВВ. Немає сумніву щодо наявності регіональної компоненти, оскільки є факт існування аномалій ВВ [Калинин, 1984]. Як указано у публікаціях [Тяпкін, 1974, 1996] аномалії вікового ходу можна представити як

відображення блокових переміщень магнітоактивного шару тектоносфери в індукції геомагнітного поля.

**Мета** даної роботи: дослідити залежність вікових варіацій геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях світової сітки від положення обсерваторії на різних тектонічних плитах і на межах між плитами.

**Використані дані.** Для дослідження використано середньорічні значення повної напруженості геомагнітного поля на магнітних обсерваторіях світової сітки за 1890—2010 р. ([www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/annual\\_means.shtml](http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/annual_means.shtml)). Вікові варіації вираховано як різницю між послідовними се-

### Кількість магнітних обсерваторій на тектонічних плитах

Назва плити	Кількість магнітних обсерваторій	Магнітні обсерваторії на межах плит
Євразійська (ЄА)	67 (4)	ASH з IP; KSA з IP; AQU з АФ; PEG з АФ
Північноамериканська (ПА)	29 (5)	LVR, YAK з ЄА; SIT, VIC з ТО; TEO з КА
Китайська (КИ)	19 (11)	CPA, CZH, SHL з ІА; ESA, НТҮ, КАК, KNZ з ТО; LSA з ІА; MMB, YSS з ОХ; KNY з ФІ
Африканська (АФ)	17 (0)	—
Антарктична (АН)	17 (1)	AMS з ІА
Індо-Австралійська (ІА)	15 (4)	AML, EYR, MCQ з ТО; SAB з КИ
Південноамериканська (ПіА)	7 (0)	—
Охотська (ОХ)	0 (2)	PET з ТО; MGA з ПА
Тихоокеанська (ТО)	2 (0)	—
Філіппінська (ФІ)	0 (2)	CBI, GUA з ТО
Наска (НА)	0 (2)	EIC з ТО; HUA з ПіА
Індокитайська (ІК)	1 (1)	TNG з ІА
Іранська (ІР)	0 (1)	QUE з ЄА і КИ
Карібська (КА)	0 (1)	SJA з ПА
Кокос (КО)	0 (1)	TEO з ПА і КА
Дрейка (ДП)	0 (1)	ORC з ПіА
Аравійська (АР)	0(1)	MLT з АФ
Хуан-де-Фука (ХДФ)	0 (0)	—

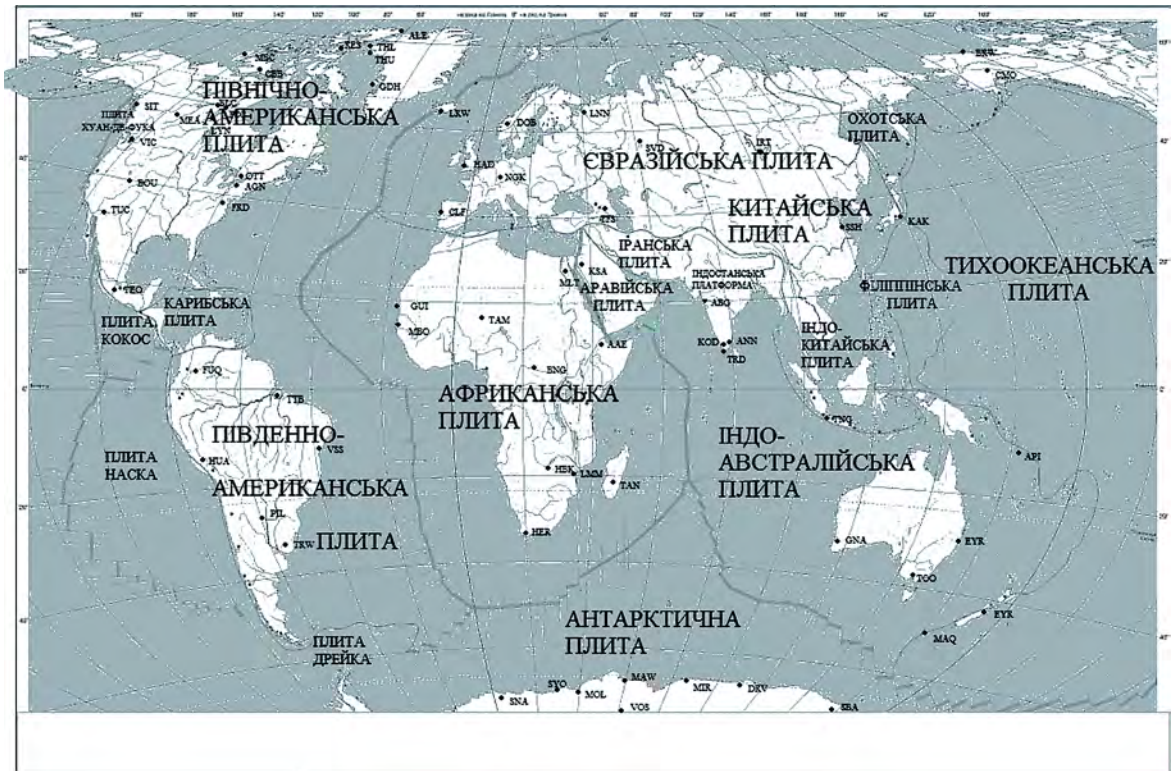


Рис. 1. Карта тектонічних плит і положення обсерваторій на плитах.

редньорічними значеннями. Одержані ряди ВВ згладжено біжними середніми значеннями з вікнами у 3 і 11 років для виключення короткоперіодних і циклічних варіацій, пов'язаних із зміною сонячної активності. Згладження середніми значен-

нями з біжним вікном 11 років веде до скорочення ряду середніх на 11 років. У таблиці скорочену назву тектонічних плит наведено у дужках прописними літерами [Жарков, 1983]. У дужках біля кількості обсерваторій на плиті вказано кількість обсерваторій, розміщених на межах плити.

На карті тектонічних плит (рис. 1) показано розміщення на них геомагнітних обсерваторій, дані яких використано у статті. На рис. 2 подано вікові варіації напруженості геомагнітного поля (ВВ(Т) — суцільна крива) на французькій магнітній обсерваторії Шамбон-ла-Форе (CLF). Слід звернути увагу на значний розкид значень, не згладжених ВВ(Т), наприкінці ХІХ та в першій половині ХХ ст. Великий розкид даних до 1940 р. можна пояснити або експериментальними помилками, або відображенням реального процесу зміни ВВ(Т). Ми вважаємо, що обидва припущення можливі. Припущення щодо розкиду даних у 1890—1940 рр. є результатом реального фізичного процесу можна

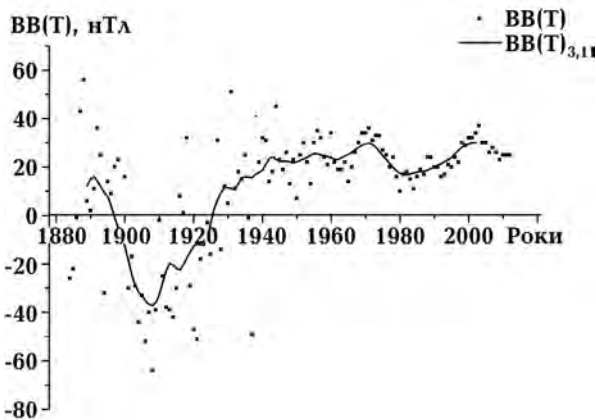


Рис. 2. Вікові варіації напруженості геомагнітного поля, згладжені 3- та 11-річними біжними вікнами ВВ(Т)<sub>3,11</sub>, та незгладжені величини ВВ(Т) на французькій магнітній обсерваторії Шамбон-ла-Форе (CLF).

підтвердити наявності у ВВ квазідворічних змін [Сумарук, Сумарук, 2009], а також змінами короткоперіодних ВВ у фазі на багатьох обсерваторіях. Це твердження потребує спеціального дослідження.

Згладжені ВВ(Т) демонструють, що в інтервалі часу з 1897 до 1926 р. ВВ повної напруженості поля на обсерваторії CLF були від'ємними. В 1926 р. ВВ(Т) поміняла знак і зростала до 1947 р. У дальшому спостерігали коливання позитивних ВВ(Т) з амплітудою близько 18 нТл. Максимуми ВВ(Т) > 0 спостерігали у 1969, 2003 рр., а мінімуми — у 1960 і 1979 рр.

На рис. 3, а зображено зміни ВВ(Т) на магнітних обсерваторіях за 1890—1998 рр.; ці обсерваторії мають найдовші ряди спостережень. Як можна бачити, ВВ(Т) на обсерваторіях LNN та NGK змінюються

у фазі протягом усього інтервалу часу і величини їх збігаються до 1969 р. Після 1969 р. амплітуда змін ВВ(Т) на субавстральній обсерваторії LNN більша, ніж на обсерваторії NGK, тобто із збільшенням широти обсерваторії амплітуда варіації зростає. Максимуми варіацій спостерігали у 1936, 1973 рр., а мінімуми — у 1946, 1965, 1986 рр. На обсерваторіях HAD та SVD ВВ(Т) суттєво відрізняється від ВВ(Т) на обсерваторіях LNN та NGK. По-перше, зміна знака ВВ(Т) на обсерваторії HAD відбулась у 1930 р., тобто значно пізніше ніж на обсерваторіях NGK та LNN, по-друге, квазисинусоїдальних змін ВВ(Т) на інтервалі часу 1936—1969 рр. не спостерігали. Максимальну величину ВВ(Т) > 0 зафіксовано на обсерваторії HAD у 1969 р., мінімальну — у 1979 р. Амплітуда квазиси-

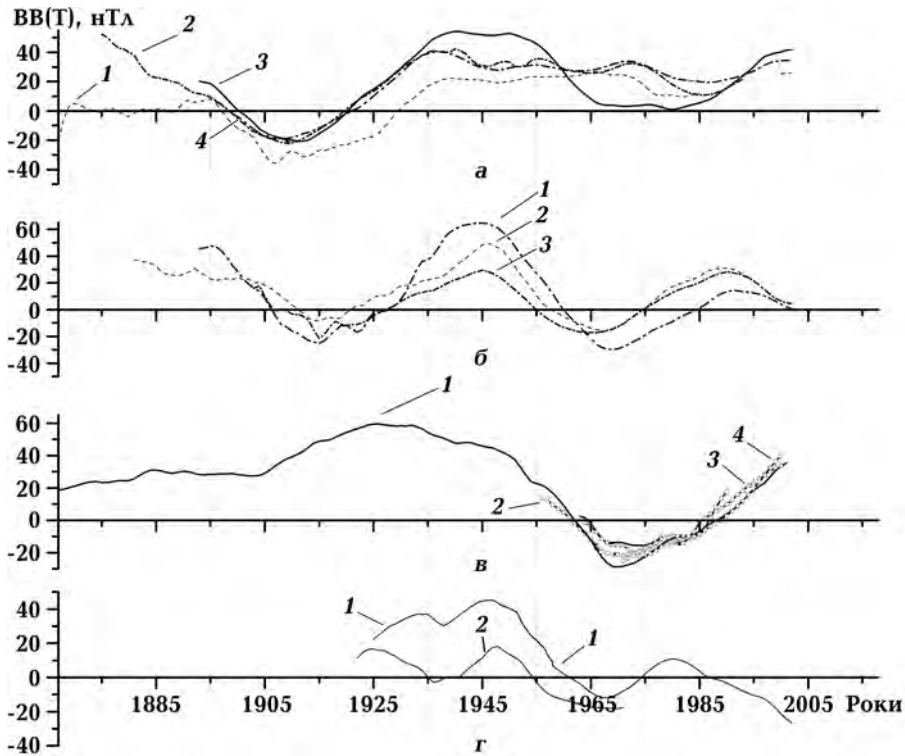


Рис. 3. Величини ВВ(Т) на різних магнітних обсерваторіях світу: а — західноєвропейські (1 — Хартланд (HAD), 2 — Німек (NGK)) та розміщені на Східноєвропейській платформі (4 — Воейково (LNN), 5 — Свердловськ (SVD)); б — азійські (1 — Іркутськ (IRT), 2 — Шешань (SSH), 3 — Какіока (KAK)); в — на Індостанській платформі, яка належить до Індо-Австралійської плити (1 — Алібаг (AVG), 2 — Кодайканал (KOD), 3 — Тривандрум (TRD), 4 — Аннамалайнагар (ANN)); г — на Австралійській платформі Індо-Австралійської плити (1 — Гнангара (GNA), Західна Австралія; 2 — Тулангі (TOO), Східна Австралія).

нусоїди на обсерваторії HAD значно менша, ніж на обсерваторіях NGK і LNN. На обсерваторії SVD до 1936 р. ВВ(Т) змінювались аналогічно змінам на обсерваторіях NGK і LNN. Однак після 1936 р. ВВ(Т) змінювались тут подібно до змін ВВ(Т) на обсерваторіях Східносибірської платформи. Іншими словами, на обсерваторії SVD ВВ(Т) мають форму, перехідну між ВВ(Т) на Східноєвропейській і Сибірській платформах. Отже, на європейських магнітних обсерваторіях нульові значення ВВ(Т) спостерігали у 1897—1903, 1920—1930 рр., а екстремальні — у 1907—1909, 1936, 1947, 1970—1973, 1986 рр.

На рис. 3, б показані графіки зміни ВВ(Т) на трьох азійських магнітних обсерваторіях. Обсерваторія IRT розміщена на границі між Євразійською (ЄА) і Китайською (КИ) тектонічними плитами, дві інші на КИ-плиті. Характерними особливостями графіків ВВ(Т) на обсерваторіях є наявність двох часових інтервалів, у яких ВВ(Т) < 0, та квазісинусоїдальні зміни ВВ(Т), причому після 1946 р. коливання мають затухаючий характер. Другий інтервал з ВВ(Т) < 0 на КИ-плиті спостерігали з 1960 ± 2 роки до 1979 ± 3 роки. На ЄА-плиті його не спостерігали, але з наближенням до КИ-плити він незначно проявляється на магнітних обсерваторіях SVD та NVS. Всі інші обсерваторії, які розміщені на КИ-плиті мають коротші ряди спостережень, але вони чітко зафіксували другий пік ВВ(Т) < 0. Так само, як на КИ-плиті, змінюється ВВ(Т) і на Охотській (ОХ) плиті (обсерваторія Петропавловськ-Камчатський — РЕТ), на рис. 3, б не показано. Амплітуди змін ВВ(Т) на КИ-плиті зростають із збільшенням широти обсерваторії. Основною відмінністю ВВ(Т) на ЄА- і КИ-плитах є відсутність змін знака ВВ на ЄА-плиті у другій половині ХХ ст., хоча спостерігали квазісинусоїду малої амплітуди ВВ(Т) > 0 після 1936 р., яка розвивається у протифазі до квазісинусоїди на КИ-плиті в цей час. Межею поділу різних типів ВВ(Т) на ЄА- та КИ-плитах є Уральські гори, які розділяють Східноєвропейську та Західносибірську платфор-

ми, що підтверджує результат, отриманий у публікації [Орлюк та ін., 2016].

На рис. 3, в зображено зміни ВВ(Т) на обсерваторіях Індостанської платформи. Найдовший ряд спостережень має магнітна обсерваторія АВГ (веде спостереження з 1846 р.). Характерною особливістю ВВ(Т) на Індостанській платформі є додатні значення з 1847 до 1962 р., які досягли максимуму в 1932 р. З 1962 до 1987 ± 2 роки ВВ(Т) < 0. Максимальні абсолютні значення ВВ(Т) < 0 у цей проміжок часу спостерігали в 1969 р., зміну знака — в 1986 р. Такий самий екскурс у бік від'ємних значень ВВ(Т) спостерігали на КИ-плиті, що засвідчує спряженість джерел варіацій. Таким чином, якщо на ЄА-плиті ВВ(Т) змінювали знак до 1920-х років і в подальшому були позитивним, то на Індостанській платформі знак ВВ(Т) > 0 до початку 1960-х років і надалі змінювався. Від 1920-х до 1960-х років на КИ-плиті спостерігаємо ріст ВВ(Т) > 0 (1946 р. — максимум) і спад ВВ(Т) > 0 до нуля наприкінці 1960-х років.

На рис. 3, г показано зміни ВВ(Т) на Австралійській платформі Індо-Австралійської (ІА) плити. На західноавстралійській обсерваторії GNA ВВ(Т) подібні до ВВ(Т) на КИ-плиті та Індійській платформі до 1979 р. Зміни ВВ(Т) у Східній Австралії, яка має складну тектонічну будову, після 1979 р., відповідають змінам ВВ(Т) на Тихоокеанській (ТО) плиті і краще корелюють з варіаціями на Новозеландській обсерваторії Амберлі-Ейрвейл (AML-EYR) (див. рис. 4, а). Обсерваторія EYR розміщена на межі ІА- і ТО-плит. Амплітуди ВВ(Т) на обсерваторії GNA значно більші, ніж на обсерваторії ТОО. Спостерігається процес зменшення амплітуд ВВ(Т) з часом. Якщо змістити криву ВВ(Т) обсерваторії GNA по осі ординат паралельно самій собі на -36 нТл, то час зміни знака на обсерваторіях буде однаковий і максимальні ВВ(Т) в 1947 р. збігуться. Після 1954 р. на обсерваторії GNA значення будуть від'ємними і в 1969 р. — найменшими за абсолютною величиною. Формальна процедура зміщення кривої ВВ(Т) по осі ординат фізично

означає, що ВВ в цьому регіоні генеруються двома джерелами — перше змінне джерело генерує однакові ВВ(Т) на обсерваторіях GNA і TOO, друге джерело дає постійну в часі складову, яку спостерігають тільки у Західній Австралії (GNA). Таким чином, Австралія поділена на дві частини: на західній спостерігають ВВ(Т) такі самі як на КИ-плиті і на Індійській платформі, на східній — подібні до ВВ(Т) на ТО-плиті.

На рис. 4, а показано зміни ВВ(Т) на обсерваторіях, розміщених на ТО-плиті та на межі ТО-плити з ІА-плитою. Найдовший ряд спостережень мають новозеландська обсерваторія AML, яка вела їх до 1978 р.

(в 1979 р. перенесена в Ейрвейл (EYR)), та API, яка знаходиться на островах Самоа. На всіх обсерваторіях спостерігають малозмінні за знаками ВВ(Т). Тільки обсерваторія AML до 1928 р. фіксувала невеликі ВВ(Т) > 0 та обсерваторія HON — ВВ(Т), що добре корелюють з варіаціями на ПА-плиті. Малозмінні ВВ(Т) на ТО-плиті показують стабільність тектонічних процесів на плиті, малий вплив зовнішніх джерел та, можливо, демпфірувальну дію океанських течій на ВВ.

На рис. 4, б показано зміни ВВ(Т) на Африканській тектонічній плиті. Найдовші ряди спостережень мають обсерваторії TAN на Мадагаскарі та HER у Південно-

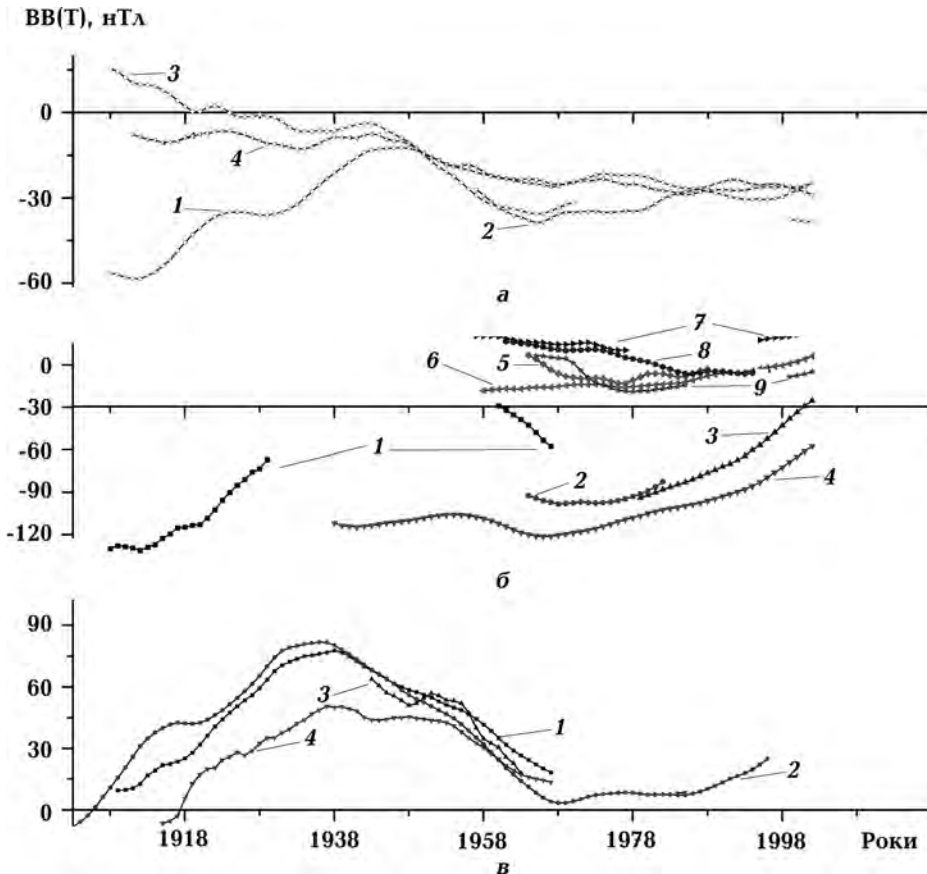


Рис. 4. Величини ВВ(Т) на обсерваторіях: а — на ТО-плиті (1 — Гонолулу (HON)) і на межі ТО-плити з ІА-плитою (2 — Мапуру (MCQ), 3 — Амберлі (AML), 4 — Апія (API)); б — на Африканській тектонічній плиті на обсерваторіях Східної Африки (1 — Тананаріве (TAN), 2 — Мапуту (LMM), 3 — Хартебесток (HBK), 4 — Херманус (HER), 5 — Адіс-Абеба (AAE)) та Західної Африки (6 — М'Бур (MBO), 7 — Таманрассет (TAM), 8 — Бангуї (BNG), 9 — Гуйнар (GUI)); в — єгипетській (1 — Хелвен-Міссалат (HLW-MLT)), грузинській (2 — Тбілісі (TFS)), ліванській (3 — Ксара (KSA)), російській (4 — Казань (KZN)).

Африканській республіці. Першою особливістю ВВ(Т) є те, що значення їх у Східній Африці, яка тектонічно активніша, значно більші, ніж у Західній. У Східній Африці  $ВВ(Т) < 0$  і зменшується за абсолютною величиною з часом та із зменшенням широти обсерваторії. На острівній обсерваторії TAN, яка розміщена близько до екватора, на лінійний тренд накладається квазисинусоїда з екстремумами в 1947 та 1969 рр. Абсолютні величини ВВ(Т)  $< 0$  зменшуються і на обсерваторіях TAN, LMM, AAE в інтервалі часу 1989—2005 рр. змінюють знак.

На обсерваторіях MBO, TAM, BNG, GUI величини ВВ(Т) малі. Характерною особливістю ВВ на Африканській плиті є зменшенням їх абсолютних величин, яке розпочалося наприкінці 1970-х років. Це засвідчує релаксацію джерел геомагнітного поля та зменшення геомагнітної активності.

На рис. 4, в показано зміни ВВ(Т) на єгипетській, грузинській, ліванській і російській обсерваторіях. Обсерваторія HLW-MLT знаходиться в зоні землетрусів і сучасного гороутворення на межі Африканської (АФ) і Аравійської (АР) тектонічних плит, обсерваторія KZN — на східній межі Східноєвропейської платформи. ВВ(Т) на обсерваторіях змінюються у фазі. Найдовший ряд спостережень має обсерваторія TFS, на якій у 1907 р. ВВ(Т) змінила знак з від'ємного на додатний. Додатні значення ВВ(Т) зростали до 1936 р. (як і на європейських середньоширотних обсерваторіях (див. рис. 3, а)), пізніше розпочався їх спад. Максимум у 1936 р. на обсерваторіях MLT, TFS випереджує такий самий максимум на азіатських обсерваторіях IRT, SSH, KAK на один сонячний цикл.

На рис. 5, а показано зміни ВВ(Т) на магнітних обсерваторіях, розміщених на Північноамериканській (ПА) плиті. Обсерваторії східного Атлантичного узбережжя Фредеріксбург (FRD) та Аженкурт (AGN) мають найдовші ряди спостережень і зафіксували ВВ(Т) найбільшої амплітуди, більшу амплітуду ВВ(Т) спостерігали тільки на обсерваторії Тананаріве. Екстремальні значення зафіксовано у 1920, 1947 рр.

У 1968 р. обсерваторію AGN було перенесено в Оттаву (OTT). ВВ(Т) на обсерваторіях західного (Тихоокеанського узбережжя) ПА-плити Сітка (SIT), Таксон (TUC), Вікторія (VIC) мають меншу амплітуду змін ВВ(Т). Найменші величини ВВ(Т) спостерігали на авроральній обсерваторії SIT. На цій обсерваторії чітко зафіксовано пік 1969 р.

Форми кривих ВВ(Т) на Атлантичному та Тихоокеанському узбережжях однакові, однак фази змін різні.

На рис. 5, б показано ВВ(Т) на обсерваторіях ПА-плити, розміщених далеко від океанів, але на різних широтах. Як видно, середньоширотні обсерваторії фіксують зміни ВВ(Т) подібні до змін на Тихоокеанському узбережжі. Зі збільшенням широти на ВВ(Т) виділено додатний пік у 1969 р., особливо добре — на полярних обсерваторіях VLC, CBV, MBC.

На рис. 6 показано ВВ(Т) на обсерваторіях, розміщених на Південноамериканській (ПіА) плиті: Фукуена (FUQ,  $\varphi = 16^\circ$ ), Татока (ТТК,  $\varphi = 8^\circ$ ), Вассоурас (VSS,  $\varphi = -13^\circ$ ), Пілар (PIL,  $\varphi = -21^\circ$ ), Трелев (TRW,  $\varphi = -33^\circ$ ) та Хуанкайо (HUA,  $\varphi = -2^\circ$ ). У дужках указано геомагнітні широти обсерваторій. На всіх обсерваторіях ВВ(Т)  $< 0$ . Максимальні абсолютні значення ВВ(Т)  $< 0$  спостерігали на приекваторіальних обсерваторіях FUQ, ТТВ, HUA у 1969 р., що відображає вплив атлантичного від'ємного фокуса ВВ. ВВ(Т) на обсерваторіях TRW, PIL і VSS найімовірніше відображають вплив антарктичного фокуса ВВ. Обсерваторія HUA зазнає впливу екваторіального іоносферного електроструменя, тому ВВ(Т) на обсерваторії добре корелюють з ВВ на обсерваторіях, розміщених біля південного магнітного полюсу.

На рис. 7 показано графіки ВВ(Т) на низькоширотних обсерваторіях Тангеранг (TNG), на Філіппінській (ФІ) плиті, Теолоюкан на межах ПА, Карибської плити (КА) та плити Кокос (КО) і субавроральній обсерваторії Домбас на ЄА- плиті. Характерною рисою цієї групи обсерваторій є наявність чітких піків у 1936 та 1969 рр. Пік 1936 р. зафіксовано на обсерваторіях

TFS, HLW-MLT, KZN (див. рис. 4, в) і на багатьох європейських обсерваторіях, причому амплітуда його на європейських обсерваторіях збільшується із збільшенням широти. Пік 1969 р. — ВВ(Т) зафіксовано

на всіх магнітних обсерваторіях світу, але різного знака. На низькоширотних обсерваторіях TNG та TEO, які знаходяться на протилежних за довготою частинах Землі, величини ВВ(Т) антикорелюють.

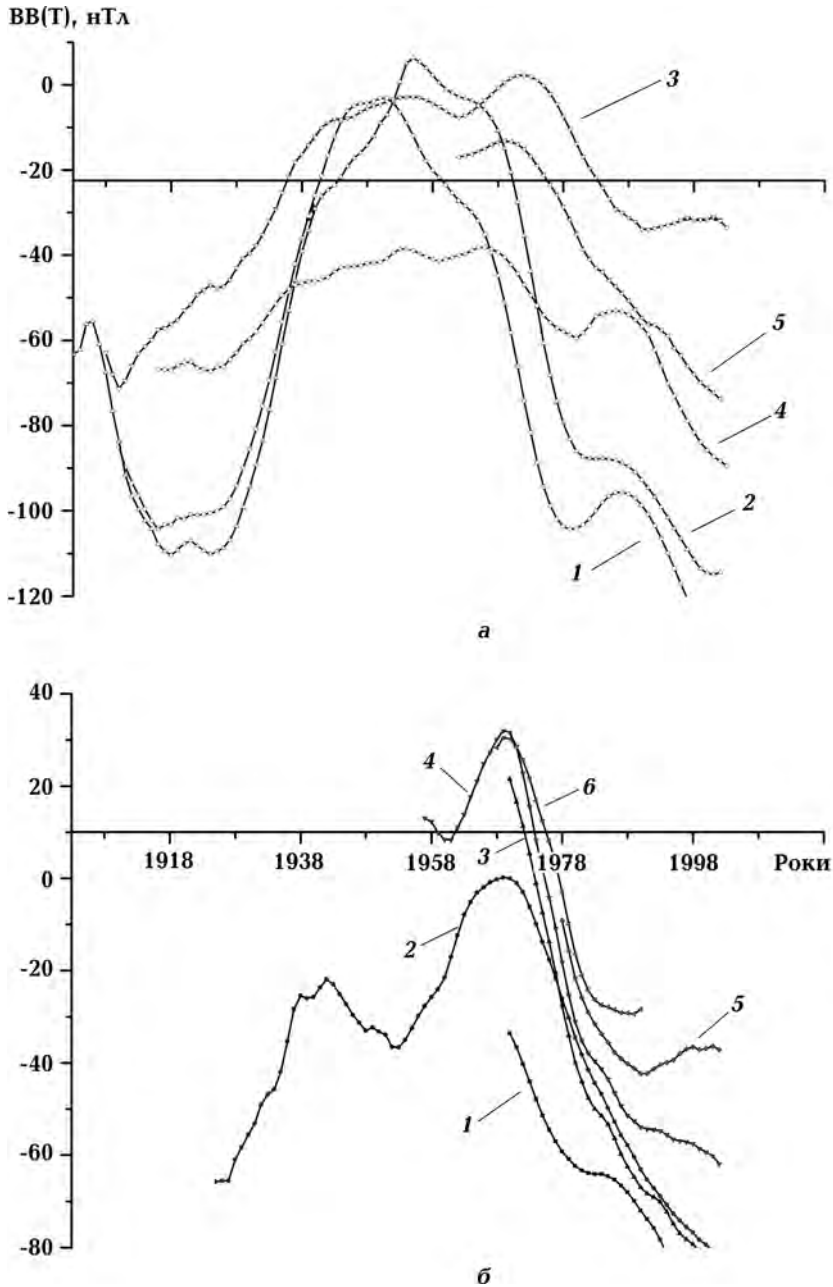


Рис. 5. Зміни ВВ(Т) на магнітних обсерваторіях, розміщених на ПА-плиті: а — східне Американське узбережжя (1 — Фредеріксбург (FRD), 2 — Аженкурт (AGN), 3 — Сітка (SIT), 4 — Таксон (TUC), 5 — Вікторія (VIC)); б — різні широти (1 — Боулдер (BOU,  $\varphi = 40^\circ$ ), 2 — Мінук (MEA,  $\varphi = 54^\circ$ ), 3 — Форт Черчилл (FCC,  $\varphi = 59^\circ$ ), 4 — Бейкер Лейк (BLC,  $\varphi = 40^\circ$ ), 5 — Кермідж Бей (CBV,  $\varphi = 69^\circ$ ), 6 — Моулд Бей (MBC,  $\varphi = 76^\circ$ )).



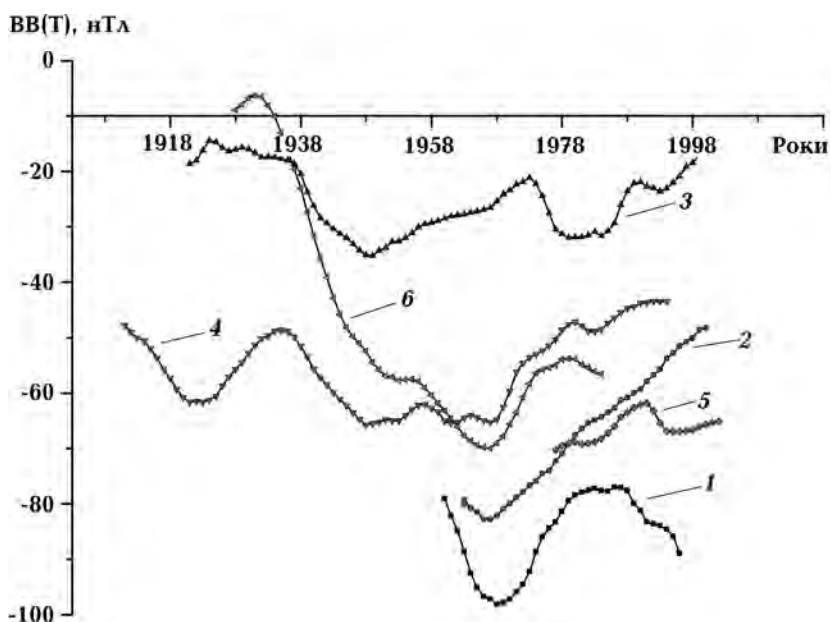


Рис. 6. Зміни ВВ (Т) на обсерваторіях, розміщених на Південноамериканській плиті: 1 — Фукуена (FUQ,  $\varphi = 16^\circ$ ), 2 — Татока (ТТК,  $\varphi = 8^\circ$ ), 3 — Вассоурас (VSS,  $\varphi = -13^\circ$ ), 4 — Пілар (PIL,  $\varphi = -21^\circ$ ), 5 — Трелев (TRW,  $\varphi = -33^\circ$ ), 6 — Хуанкайо (HUA,  $\varphi = -2^\circ$ ).

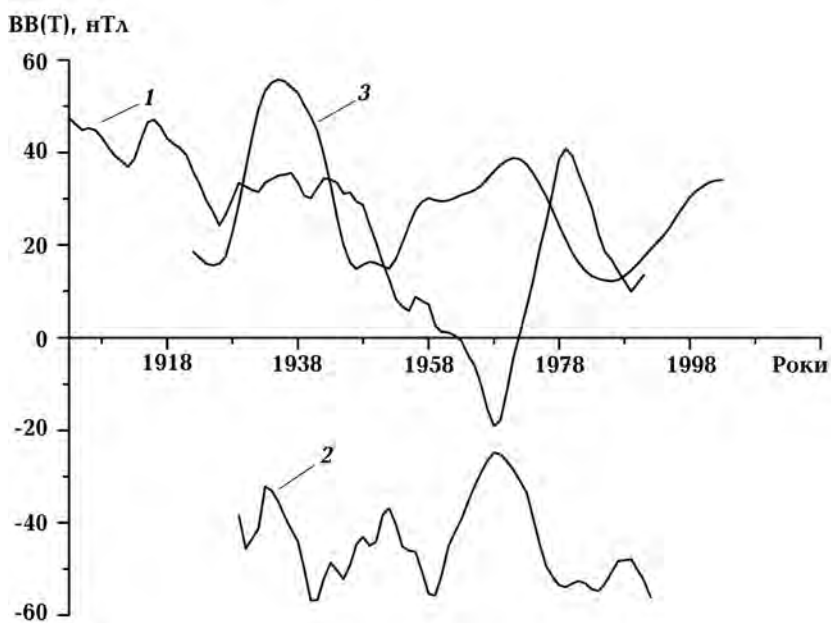


Рис. 7. Зміни ВВ (Т) на низькоширотних обсерваторіях: 1 — Тангеранг (TNG,  $\varphi = -6^\circ$ ,  $\lambda = 107^\circ$ ) на ФІ-плиті; 2 — Теолоюкан (ТЕО,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\lambda = 260^\circ$ ) на межі ПА-, КА- та КО-плит; 3 — на субавроральній обсерваторії Домбас (DOV,  $\varphi = 62^\circ$ ,  $\lambda = 9^\circ$ ) на ЄА-плиті.

На рис. 8, *a* наведено ВВ(Т) у високих широтах Північної та Південної півкуль. За даними обсерваторії GDH ( $\varphi = 69^\circ$ ,  $\lambda = 306^\circ\text{E}$ ), яка розміщена у Гренландії, спостерігали зміну знака ВВ(Т) з від'ємного

на додатний, тобто напруженість магнітного поля почала зростати, в 1946 р. Величина ВВ(Т) майже лінійно зростала до 1969 р. Це підтверджується даними обсерваторій Туле (THU), Алерт (ALE), Ре-

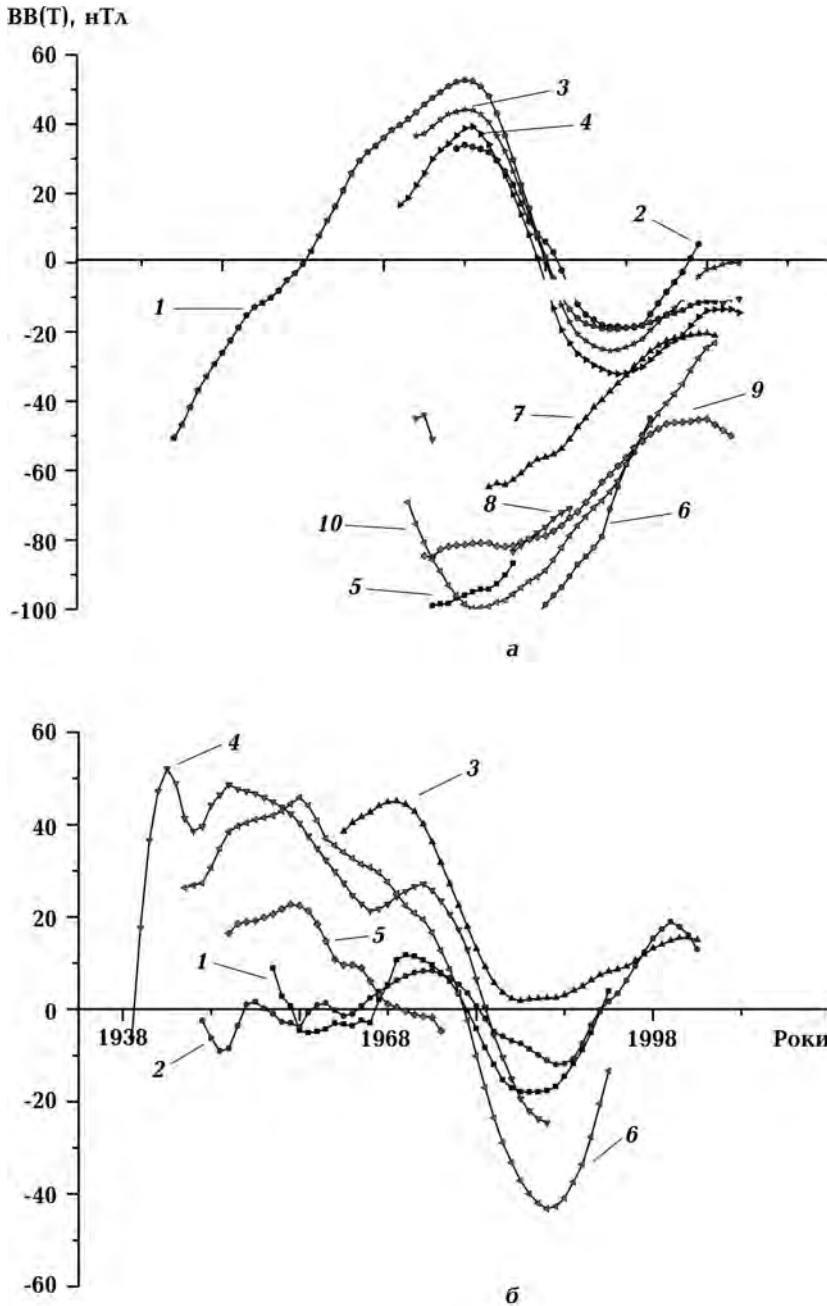


Рис. 8. Зміни ВВ(Т) у високих широтах Північної та Південної півкуль: *a* — полярна шапка Північної півкулі (обсерваторії: 1 — Годхавн (GDH) ( $\varphi = 69^\circ$ ,  $\lambda = 306^\circ\text{E}$ ), 2 — Туле (THU), 3 — Алерт (ALE), 4 — Резольют Бей (RES)); високі широти Південної півкулі (5 — Восток (VOS), 6 — Молодьожная (MOL), 7 — Дьомон-д-Юр-віль (DRV), 8 — Мирний (MIR), 9 — Скот Бейс (SBA), 10 — Маусон (MAW)); *б* — авроральна зона Північної півкулі (обсерваторії: канадські (1 — Барров (BRW), 2 — Коледж (СМО)), ірландська (3 — Лейрвокур (LVR)); російські (4 — ДІК, 5 — ТІК, 6 — ССС)).

зольот Бей (RES), які розміщені на широтах понад  $70^\circ$ . У високих широтах Південної півкулі на антарктичних обсерваторіях Восток (VOS), Молодьюжная (MOL), Сьова (SYO), Дьюмон-д'Юрвіл (DRV), Мирний (MIR), Скот Бейс (SBA) та Маусон (MAW), які розпочали працювати із початком Міжнародного геофізичного року, в 1957—1958 рр. спостерігали різке збільшення від'ємних значень  $BB(T)$ , тобто прискорене зменшення напруженості геомагнітного поля ( $BB(T) < 0$ ). Найінтенсивніший процес зменшення напруженості поля зафіксовано на обсерваторіях Новолазаревська і Санає (сектор африканських довгот). Процес збільшення  $BB(T)$  у північній полярній шапці, та зменшення — у південній тривав до 1969 р. Від 1969 р. ріст абсолютних величин  $BB(T)$  на обох полярних шапках змінився зменшенням і близько 1979 р. у північній полярній шапці  $BB(T) = 0$ , а у південній продовжує зменшуватись.

На рис. 8, б показано  $BB(T)$  розміщені у північній зоні полярних сьйв. Канадські обсерваторії BRW, СМО та ірландська LVR, які розміщені близько полюса, фіксують зміни  $BB(T)$  подібні до змін у полярній шапці меншої амплітуди, а російські обсерваторії DIK, TIK та CCS за інтервал часу з 1947 до 1979 р. реєструють зменшення  $BB(T) > 0$  і навіть зміну знака. Такий характер змін  $BB(T)$  у зоні полярних сьйв не дає змогу пояснити  $BB(T)$  у високих широтах зсувом центрального диполя до півночі. Крім того, перехід через нуль  $BB(T)$  відбувається в авроральній зоні в різні роки. Це означає, що  $BB(T)$  у цій зоні генерується двома джерелами: інтенсивність одного джерела змінюється у фазі зі змінами у полярній шапці; другого — постійна, але змінюється просторово. Величину цієї постійної для певної обсерваторії  $BB(T)$  можна знайти, зсунувши по осі ординат криві  $BB(T)$  паралельно самим собі так, щоб перехід через нуль відбувся у 1979 р. на кожній авроральній обсерваторії. Те, що  $BB(T)$  у високих широтах не можна пояснити зміщенням на північ центрального геодиполя, засвідчують і зміни  $BB(T)$  у полярних шапках обох півкуль

після 1979 р. У північних високих широтах зміни  $BB(T)$  відбувалися за квазісинусоїдами різної амплітуди, а у південних — зменшувалися за абсолютною величиною майже лінійно (див. обсерваторії MAW, MOL, SYO, VOS, MIR). Тільки на обсерваторіях DRV та SBA, найближчих до південного геомагнітного полюса, процес лінійного зменшення абсолютних величин  $BB$  був перерваний у 1991 р. і  $BB(T) < 0$  почали тут зростати по абсолютній величині.

**Обговорення.** Як показано вище, вікові варіації геомагнітного поля, очищені від складових, генерованих зовнішніми джерелами, інтенсивність яких змінюється із короткими періодами, на різних тектонічних плитах мають різні графіки залежності від часу. Очевидно, часові зміни від різних джерел мають давати складові, величина яких залежить від зміни з часом інтенсивності кожного джерела. Якщо допустити, що складові  $BB(T)$  від різних джерел змінюються синхронно зі зміною геомагнітної активності, то можна їх виділити, знаючи основні періоди змін цієї активності. Внутрішні джерела  $BB(T)$  можуть бути планетарними та регіональними. Згідно із сучасними уявленнями, планетарним джерелом  $BB$  є струми на межі ядро—мантія, які можуть змінювати інтенсивність і положення. Зі збільшенням інтенсивності внутрішніх струмів  $BB(T) > 0$  і, навпаки, зі зменшенням інтенсивності струмів  $BB(T) < 0$  по всій Землі. Із зміною положення струмів знак  $BB(T)$  залежить від напрямку зміщення. Зміна регіональних внутрішніх джерел веде до таких самих змін  $BB(T)$  в окремих регіонах. Аналітичне зображення таких варіацій подано у багатьох публікаціях [Калинин, 1984; Деміна и др., 2008 а, б], виконано пошук фізичних механізмів таких джерел [Рузмайкин и др., 1989]. Порівняння графіків  $BB(T)$  на різних тектонічних плитах указує на значний вплив тектонічних процесів на  $BB(T)$ , оскільки їх часові зміни різні на плитах і навіть на платформах однієї плити. Так, різними є  $BB(T)$  на СА- і КИ-плитах, на східній і західній частинах Австралійської платформи, на Північноамерикан-

ській та Африканській тектонічних плитах. На кожній тектонічній плиті графіки змін ВВ(Т) суттєво різняться. Виділено два регіони на Землі, на яких амплітуди змін ВВ(Т) максимальні. Перший регіон — це східна частина ПА-плити, КА-плита та північна частина ПіА-плити; другий — західна частина Індійського океану (обсерваторії TAN і PLS). Обсерваторії на ТО-плиті та на межах її з іншими плитами спостерігають дуже малі та малозмінні ВВ(Т). На ВВ(Т), що мають внутрішні джерела, тобто залежать від тектонічних процесів, накладається складова, що пов'язана із зовнішніми джерелами, тобто залежить від сонячної та геомагнітної активності.

Особливої уваги заслуговують ВВ(Т) у полярних шапках Землі та на широтах зони полярних сьйв. Ряди спостережень тут короткі (найдовший ряд у цьому регіоні має обсерваторія GDH, усі інші почали вести спостереження у Міжнародний геофізичний рік), тим не менш характерні зміни ВВ(Т) дають змогу припустити, що вони тісно пов'язані із геомагнітною та сонячною активністю. Екстремуми кривих і зміна знака ВВ(Т) збігаються із максимумами чи мінімумами сонячної активності. Такі самі зміни спостерігаються і на графіках зміни ВВ(Т) у середніх широтах обох півкуль Землі, хоча амплітуда їх менша.

**Висновки.** Вікові варіації напруженості геомагнітного поля на обсерваторіях, розміщених на різних тектонічних плитах, суттєво різняться як за амплітудами, так і за характером часових змін. За час інструментальних спостережень абсолютних значень поля максимальні значення ВВ(Т) спостерігали на ПА-, КА-плитах і на шельфі АФ-плити. Обсерваторії, графіки часових змін ВВ(Т) яких очищені від короткоперіодних варіацій, генерованих зовнішніми джерелами, за характером змін можна поділити на 10 груп, що наведені нижче:

- 1) високоширотні обсерваторії Північної та Південної півкуль Землі, які охоплюють полярні шапки та авроральні зони ЄА-, ПА- та АН-плит;
- 2) низькоширотні приекваторіальні обсер-

- ваторії, які розміщені на ПА-, АФ-, ІК-плитах;
- 3) Західноєвропейські обсерваторії (NGK, HAD) та обсерваторії на Східноєвропейській платформі у середніх широтах ЄА-плити (LNN, SVD);
- 4) обсерваторії, що розміщені на Західно-сибірській, Сибірській платформах, ЄА-та КИ-плиті;
- 5) обсерваторії Індостанської платформи ІА-плити;
- 6) середньоширотні обсерваторії ПА-плити;
- 7) окрема група обсерваторій: MLT — в Єгипті, KSA — в Лівані, TFS — в Грузії та KZN — на Волзі;
- 8) група обсерваторій, розміщених на ПіА-та КА-плитах;
- 9) обсерваторії на Австралійській платформі;
- 10) обсерваторії на ТО-плиті та на її межах.

Графіки ВВ(Т) на кожній з вищеперелічених груп обсерваторій змінюються особливим чином тільки для певної групи способом. Знакозмінні ВВ(Т) спостерігають тільки на ЄА-, КИ- та ІА-плитах і високоширотних обсерваторіях Канади (FCC, VLC, СВВ, МВС). На обсерваторіях, які розміщені на межі між Східноєвропейською та Західно-сибірською платформами (SVD, NVS), спостерігаємо графіки ВВ(Т) перехідного типу. Знакозмінні коливання ВВ(Т) на Сибірській платформі, ЄА-та КИ-плиті — антикорелюють з ВВ(Т) < 0 коливаннями на ПА-плиті. Значний вплив на вікові варіації має інтенсивність тектонічних процесів. Це добре підтверджується ВВ(Т) у Східній і Західній Африці, Східній і Західній Австралії, на Атлантичному і Тихоокеанському узбережжях ПА-плити. У полярних шапках і зонах полярних сьйв, на європейській та азіатській частинах ЄА-плити ВВ(Т) містять значну за величиною компоненту, пов'язану із сонячною та геомагнітною активностями. Такого самого впливу, але меншого за величиною зазнає ВВ(Т) на середньоширотних обсерваторіях. Це питання потребує окремого дослідження.

Основною закономірністю загальної кар-

тини вікової варіації геомагнітного поля є — подальше зменшення напруженості поля на всій Землі. Регулярне невелике збільшення поля спостерігаємо тільки на європейській частині ЄА-плити, причому процес збільшення тут відбувається у коливному режимі у фазі зі зміною геомагнітної активності.

Підсилюється негативний фокус ВВ(Т) в Атлантичному океані: на обсерваторії FRD ВВ(Т) досягла  $-130$ , на обсерваторії SJG  $-140$  нТл/рік, що підтверджує результат, отриманий у 1960-ті роки [Орлов и др., 1968].

*Автори виражають щире подяку професору М. І. Орлюку за цінні поради та допомогу під час написання статті.*

### Список літератури

- Бондарь Т. Н., Головков В. П., Яковлева С. В. Магнитное поле Земли в XX веке. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. Т. 46. № 3. С. 409—412.
- Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Москва: Наука, 1973. 240 с.
- Демина И. М., Королева Т. Ю., Фарафонова Ю. Г. Аномалии векового хода главного геомагнитного поля в рамках иерархической дипольной модели. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008а. Т. 48. № 6. С. 849—858.
- Демина И. М., Никитина Л. В., Фарафонова Ю. Г. Вековые вариации главного магнитного поля Земли в рамках динамической модели его источников. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008б. Т. 48. № 4. С. 567—575.
- Демина И. М., Фарафонова Ю. Г. Дипольная модель главного магнитного поля Земли в XX веке. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004. Т. 44. №4. С. 565—570.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли. Москва: Наука, 1983. 416 с.
- Калинин Ю. Д. Вековые геомагнитные вариации. Новосибирск: Наука, 1984. 160 с.
- Касьяненко Л. Г., Демина И. М., Сос-Ухриновский А. Представление главного магнитного поля Земли системой оптимальных по ориентации и местоположению диполей. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. Т. 42. № 6. С. 838—844.
- Орлов В. П., Ивченко М. И., Базаржапов А. Д., Коломийцева Г. И. Вековой ход геомагнитного поля для периода 1960—1965 годов. Москва: Изд-во ИЗМИРАН, 1968. 68 с.
- Орлюк М., Марченко А., Роменець А. Зв'язок сейсмічності Землі та вікових змін її магнітного поля. *Вісник Київського національного університету. Геологія*. 2016. № 4 (75). С. 50—54.
- Рузмайкин А. А., Соколов Д. Д., Шукуров А. М. О природе вековых вариаций главного магнитного поля Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1989. Т. 29. № 6. С. 1001—1006.
- Сумарук Т. П., Сумарук П. В. Квазідворічні варіації магнітного поля Землі. *Доп. НАН України*. 2009. № 1. С. 114—116.
- Сумарук Ю. П., Сумарук Т. П. Про вклад зовнішніх джерел у вікову варіацію геомагнітного поля. *Доп. НАН України*. 2013. № 12. С. 107—113.
- Тяпкин К. Ф. Новая ротационная гипотеза формирования тектонических структур в земной коре. *Геол. журн*. 1974. № 4. С. 3—16.
- Тяпкин К. Ф. Новая ротационная модель магнитного поля Земли. *Геол. журн*. 1996. Т. 18. № 1. С. 30—37.
- Шевнин А. Д., Левитин А. Е., Громова Л. И., Дремухина Л. А., Кайнара Л. Н. Солнечная циклическая вариация в магнитных элементах обсерватории "Москва". *Геомагнетизм и аэрономия*. 2009. Т. 49. № 3. С. 315—320.
- Data catalogue. WDC, Kyoto, 2005. 183 p.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotriaros 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 Planets Space* 68 (112). doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Golovkov V. P., Bondar T. N., Burdelnaya I. A., Yakovleva S. U.*, 1997. Using satellite magnetic survey for Spatial — temporal modeling of the geomagnetic secular variation. *J. Geomag. Geoelectr.* 49, 207—227.
- Langel R. A., Estes R. H.*, 1985. The near-earth magnetic field at 1980 determined from MAGSAT data. *J. Geophys. Res.* 90, 2495—2509.
- Olsen N.*, 2002. A model of the geomagnetic field and its secular variations for epoch 2000 estimated from Orsted data. *Geophys. J. Int.* 149, 454—462. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01657.x>.
- Sumaruk Yu.*, 2000. Sources of secular variations of the Earth's magnetic field. *Contrib. Geophys. Geod.* 30 (2), P. 158.
- Verbanac G., Luhr H., Rother M., Korte M., Mandea M.*, 2007. Contributions of the external field to the observatory annual means and a proposal for their corrections. *Earth Planets Space* 59, 251—257.

## Secular variations of the geomagnetic field on lithosphere plates of the Earth

© P. V. Sumaruk, T. P. Sumaruk, 2018

The dependence of the value and sign of the geomagnetic secular variations (SV) refined of 3- and 11-year components on the position of observatories at different tectonic plates is investigated. The observatories of the long row observations were used for the studies. It is shown, that SV contain the components from internal and external sources. The values of the components change from plate to plate and even on the same plate. The secular variations have greater amplitudes in the regions with the intensive tectonic processes. Ten regions, having peculiar character of the SV, are distinguished. Secular variation may be of opposite phases in different tectonic plates, but extremes of their curves of hourly changes and the change of SV sign in most cases coincide with maximums and minimums of solar and geomagnetic activities. The assumption is made that internal and external sources of SV of the geomagnetic field are mutually connected. External sources play an important role in generation of SV. The maximal amplitudes of SV during all observational period were observed in two regions: the first region — the eastern part of the North-American plate, Caribbean plate and the northern part of the South-American plate, the second region — the western part of the Indian ocean. The value of SV component from the external sources depends on the geomagnetic latitudes of the observation places. Its amplitude increases with the increase of latitude of the observatories. The maximal values of SV components from external sources are observed at the magnetic and geomagnetic poles. The influence of the external sources on SV value is observed at the observatories placed under equatorial ionospheric electrojet. The main peculiarity of the nowadays geomagnetic field secular variations is decreasing the field intensity in the most regions of the Earth. In the second half of the twentieth century the regular small increasing of the field is observed only in the European part of Eurasian plate.

**Key words:** geomagnetic field, secular variation, external sources, lithospheric plates.

References

- Bondar T.N., Golovkov V.P., Yakovleva S.V., 2006. The geomagnetic field in the XX century. *Geomagnetizm i aeronomiya* 46 (3), 409—412 (in Russian).
- Vitinskiy Yu. I., 1973. Cyclicity and solar activity prediction. Moscow: Nauka, 183 p. (in Russian).
- Demina I. M., Koroleva T. Yu., Farafonova Yu. G., 2008a. Anomalies in the secular variations in the main geomagnetic field in the context of the hierarchic dipole model. *Geomagnetizm i aeronomiya* 48(6), 849—858 (in Russian).
- Demina I. M., Nikitina L. V., Farafonova Yu. G., 2008b. Secular variation in the main geomagnetic field within the scope of the dynamic model of field sources. *Geomagnetizm i aeronomiya* 48 (4), 567—575 (in Russian).
- Demina I. M., Farafonova Yu. G., 2004. Dipole model of the main geomagnetic field in the XX century. *Geomagnetizm i aeronomiya* 44 (4), 565—570 (in Russian).
- Zharkov V.N., 1963. The internal building of the Earth. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian).
- Kalinin Yu. D., 1984. Secular geomagnetic variation. Novosibirsk: Nauka, 160 p. (in Russian).
- Kasyanenko L. G., Demina I. M., Sos-Ukhrinovskiy A., 2002. Presentation of the main field of the Earth by the system of optimal on orientation and positions dipoles. *Geomagnetizm i aeronomiya* 42 (6), 838—844 (in Russian).
- Orlov V.P., Ivchenko M.I., Bazarzhapov A.D., Kolomyitseva G.I., 1968. Secular changes of the geomagnetic field for 1960—1965. Moscow: IZMIRAN, 68 p. (in Russian).
- Orlyuk M., Marchenko A., Romenets A., 2016. Earth's seismicity and secular changes of its magnetic field. *Visnyk Kyyivskoho natsionalnoho universytetu. Heolohiya* (4), 50—54 (in Ukrainian).
- Ruzmaykin A.A., Sokolov D.D., Shukurov A.M., 1989. On the nature of the main geomagnetic field secular variations. *Geomagnetizm i aeronomiya* 29 (6), 1001—1006 (in Russian).
- Sumaruk T.P., Sumaruk P.V., 2009. Quasi two year variations of the Earth's magnetic field. *Dopovidi NAN Ukrayiny* (1), 114—116 (in Ukrainian).
- Sumaruk Yu. P., Sumaruk T. P., 2013. About the contribution of external sources in the age variation of the geomagnetic field. *Dopovidi NAN Ukrayiny* (12), 107—113 (in Ukrainian).
- Tyapkin K. F., 1974. The new rotation hypothesis of the tectonic structures formation in the Earth's crust. *Geologicheskij zhurnal* (4), 3—16 (in Russian).
- Tyapkin K. F., 1996. The new rotation model of the Earth's magnetic field. *Geologicheskij zhurnal* (4), 3—16 (in Russian).
- Shevnin A. D., Levitin A. E., Gromova L. I., Dremukhina L. A., Kaynara L. N., 2009. Solar cyclic variation in magnetic elements of Moscow observatory. *Geomagnetizm i aeronomiya* 49(3), 315—320 (in Russian).
- Data catalogue. WDC, Kyoto, 2005. 183 p.
- Finlay C. C., Olsen N., Kotriaros 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 Planets Space* 68 (112). doi: 10.1186/s40623-016-0486-1.
- Golovkov V.P., Bondar T.N., Burdelnaya I.A., Yakovleva S.U., 1997. Using satellite magnetic survey for Spatial — temporal modeling of the geomagnetic secular variation. *J. Geomag. Geoelectr.* 49, 207—227.
- Langel R. A., Estes R. H., 1985. The near-earth magnetic field at 1980 determined from MAGSAT data. *J. Geophys. Res.* 90, 2495—2509.
- Olsen N., 2002. A model of the geomagnetic field and its secular variations for epoch 2000 estimated from Orsted data. *Geophys. J. Int.* 149, 454—462. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01657.x>.
- Sumaruk Yu., 2000. Sources of secular variations of the Earth's magnetic field. *Contrib. Geophys. Geod.* 30 (2), P. 158.
- Verbanac G., Luhr H., Rother M., Korte M., Mandea M., 2007. Contributions of the external field to the observatory annual means and a proposal for their corrections. *Earth Planets Space* 59, 251—257.

ПАМЯТИ АНДРЕЯ НИКОЛАЕВИЧА  
ГЕРАСИМЕНКО

(13.12.1947—06.08.1982)



Андрей Николаевич Герасименко родился в Галиче 13 декабря 1947 г. в семье служащих. Детство Андрея прошло в Ланчине, старинном местечке в живописных местах Предкарпатья на берегу р. Прут. Среднюю школу закончил в Ивано-Франковске. В 1966 г. Андрей поступил на геолого-разведочный факультет Ивано-Франковского института нефти и газа, где принимал участие в работе секции физики и математики студенческого научного общества под руководством профессора Е. М. Скублевского. В 1967 г. на 5-й студенческой научно-технической конференции ИФИНГ А. Н. Герасименко

в соавторстве с А. А. Снарским<sup>1</sup> были представлены доклады: "Определение земного тяготения методом пружины" и "Об одном вопросе, связанном с функцией гравитации", отмеченные премией студенческих работ по физике ВДНХ в Москве. Одна из статей "Об одном вопросе ..." в 1968 г. была опубликована в "Записках Ленинградского горного института, серия физика". Андрей так прокомментировал ее публикацию в письме к Андрею Снарскому: "Мне предложили напечатать ту статью, которую мы вместе представляли на конференции в прошлом учебном году в ИФИНГе как дискуссионную — это

---

<sup>1</sup> Снарский Андрей Александрович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики НТУУ "КПИ".



касается, прежде всего, применения к гравитационным взаимодействиям уравнений Максвелла (а поэтому для молодежи ЛГИ весьма полезную) — здешние физики сочли возможным напечатать”.

Совместная работа студентов, двух Андреев, стала началом многолетней переписки молодых ученых (с 1967 по 1976 г.). Далее по тексту курсивом обозначены выдержки из писем Андрея к А. Снарскому.

Из письма Андрея с геологической практики ИФИНГа в 1967 г.: *Все эти дни занимаюсь математикой, в частности, с одним из красивейших разделов ее — теорией аналитических функций. Недавно, впрочем, наткнулся на одну книжонку в здешней библиотеке (удивительно, откуда в такой глуши библиотека взялась), называется она “Моделирование сложных систем” Амосова Н. М., к которой так присосался, что не отрываясь, прочел ее в один день. Моделирование относится, правда, к так называемым биологическим системам, тем не менее, чувствуется сила этого метода и не только в одной биологии, но и в других сложных процессах всевозможных отраслей естественных наук, в особенности там, где количественный метод математики становится бессильным. Поэтому успехи развития математики в вышеуказанных разделах естествознания в полной мере зависят от развития моделирования. Сложные процессы развития орогенеза, геосинклинальных областей, платформенных участков и др. с помощью моделирования могут быть представлены в стройный ряд систем уравнений алгебры, что сделало бы возможным вскрытие причин возникновения этих тектонических и структурных особенностей земной коры.*

*... Где-то в середине практики мы хотели внести в отчет по геологической практике одну главу, содержание которой вытекало бы из наших наблюдений над зависимостью распространения растительности от выходов в тех или иных зонах видов горных коренных пород. Такая закономерность была нами подмечена. Например, береза растет только у*

*выходов песчанистых пород; у выходов аргиллитов (глинистых) пород растут, как правило, малина, шиповник и некоторые др. Важность подобного исследования становится понятной, если учесть целый ряд трудностей, связанных с очень плохой обнаженностью скрытых по доволно мощным чехлом четвертичных отложений гревних горных пород. Но трудность исследований такой зависимости, как это оказалось при первых наших попытках, проистекала от совершенного незнания нами ботаники. Я сразу же написал домой родителям с просьбой немедленно выслать книгу “Геоботанические методы поисков полезных ископаемых”, которую купил еще, будучи в прошлом году на ВДНХ в Москве. Отца, к сожалению, не было в то время дома, а мама выслала мне книги совершенно не по той тематике, которую я просил.*

*Тот факт, что объектом исследований у геологов и геофизиков является Земля, служащая при обычных лабораторных исследованиях основной системой внимания, делало непригодными целый ряд идеализирующих допущений, используемых почти повсеместно в физике. Все это утрачивается, однако, с помощью общей теории информации. Собственно говоря, это есть, на мой взгляд, один из методов кибернетики, сулящий в геофизике ряд революционных преобразований ее методов, а совместно с моделированием трудно переоценить ее значение в геологии. Использование в теории информации таких разделов, как теория групп, множеств, топологии, методов квантования полей, правда, несколько затрудняет, а в соответствующих местах делает почти невозможным понимание их. Здесь сказывается просто недостаточность математической подготовленности, хотя на это, мне кажется, стоит обратить внимание.*

В 1968 г. Андрей, вдохновленный строками предисловия книги “Магниторазведка” А. А. Логачева об использовании в лабораториях Ленинградского горного института новой вычислительной техни-

ки, подает документы для перевода в этот вуз. Перевод состоялся осенью при поддержке декана геофизического факультета И.Г. Клушина.

*“Недавно, совсем недавно получил я, наконец, возможность отправить домой телеграмму с таким текстом: «Принят Геофизический окончательно. Андрей». А день перед тем я отправил письмо туда же с совсем иным содержанием, считая прием в Горный институт бесповоротно и окончательно неудавшимся. Не правда ли, — какая быстрая и столь неожиданная перемена настроений? Впрочем, будучи еще дома, в Ивано-Франковске, в какой-то мере я предчувствовал это обстоятельство, не позволившее бы мне перейти на Геофизический факультет Горного института, что, однако, помешало мне принять соответствующие меры (оказавшиеся бы также безнадежными) заранее, так это — «надежда — верная сестра». Дело в том, что “по состоянию здоровья к обучению в ЛГИ” я признан «негодным». Несмотря на то, что ценой и потерянного времени гаром, и здоровьем и пр., а также и потерянного времени учащихся в Ленинградском Гидрометеорологическом Институте ивано-франковцев, я все-таки представил удовлетворительные медицинские справки. В медпункте на них посмотрели довольно равнодушно и попросили показать военный билет, в котором указана статья по расписанию болезней и по которой я даже снят с воинского учета, а тем паче — и с воинской обязанности. Никакие уговоры, доказательства, рассуждения эффекта не произвели на них никого впечатления, и мне казалось, что все уже кончено. (В справке с моей фамилией сообщалось отнюдь не о моем удовлетворительном состоянии здоровья, разумеется.) Но все-таки я нажимал на то, что в настоящее время, судя по результатам медицинского обследования, представленным в мед. справке, мое здоровье вполне удовлетворительно и что я несколько не в состоянии понять — к чему всякое там рытье в моих детских болезнях и т. д.*



*и т. п. Но позже, все-таки, все оказалось в порядке. Декан согласился принять меня, невзирая на протесты «институтских крыс-медиков», и вот только недавно получил студенческий билет, давший мне возможность посещать читальные залы и библиотеки. Постоянное место в общежитии получил только вчера. Это, впрочем, огромное восьмизэтажное здание, находящееся в очень тихом, спокойном месте Васильевского острова, в котором живут студенты Геологоразведочного, Геофизического и Шахтостроительного факультетов, а также студенты-иностранцы, которых здесь, как говорится, сплошь и рядом; преимущественно — кубинцы, азиаты и африканцы.”*

*“Недавно получил студенческий билет, давший мне возможность посещать читальные залы и библиотеки. Готовлюсь сейчас к госдаче экзаменов и зачетов по уравнениям математической физики и специальным функциям, вычислительной математики, вычислительным машинам и программированию, а также магнито-*

разведке. Работы пока очень много. Думаю, однако, к середине октября кончить. ... Заниматься фактически приходится лишь 12 часов в сутки и не более. В самом геле, читальные залы Публичной Библиотеки работают до 22 ч., занятия в Институте чуть более 6 ч., начинаются в 8.50 утра. Чтобы только добраться из одного конца города в другой посредством, допустим, только одного метро, нужно около получаса. Вот почему жители больших городов так бегут, спешат, а в вагонах метрополитена, трамваев нередко можно видеть что-то читающих и причем в большом количестве довольно. И чтобы не терять даром времени, я уже тоже пристрастился к чтению в дороге, — тут, понимаешь, иначе просто нельзя. Впрочем, в этом смысле дошел до такой степени, что когда об этом прослышал декан, вызвал он меня в деканат и заявил, что если буду продолжать заниматься и далее в таком же духе, то или отдам концы или до этого отошлет меня обратно в Ивано-Франковск. Совладать с собой, однако, не могу — время слишком дорого, а тем более в молодом возрасте и дается которое один раз в жизни. Всего-навсего один раз."

После поступления на геофизический факультет Ленинградского горного института, на первом же общеинститутском собрании Андрей ставит вопрос о деятельности СНО. "Дальнейшая плодотворная деятельность многих ученых начиналась именно со студенческой скамьи. И результаты первых научных изысканий сообщались на конференциях студенческих научных обществ" — писал Андрей в институтской газете после конференции СНО. Его поддержали на кафедре геофизики и дали понять, что необходимо в таком же духе вести себя на Ученом совете, куда нас пригласили, в том числе и меня.

Ученый совет утвердил программу увеличения математической программы обучения студентов-геофизиков и состав преподавателей.

"В этом семестре закончили чтение первой части тензорного исчисления (на

уровне книги Кочина «Начала векторного и тензорного исчисления»); на следующем семестре — продолжение (на уровне книги Рашевского). По теории Ф.К.П. в следующем семестре — аналитическое продолжение по динамической теории упругости — решение задач с граничными условиями. Возможно, начнется чтение курса по вариационному исчислению. Нам удалось внести эти факультативные курсы в учебную программу факультета. Затем будут читаться курсы по теории информации и теории анализа операций. Прошло уже несколько лекций по теории функций комплексного переменного, которые мы организовали через СНО (точнее — от имени СНО). Таких лекций мне никогда не приходилось слушать — я их воспринимаю прямо как откровение. Читают их два раза в неделю."

Ядро СНО составляли студенты, жившие с Андреем в одной комнате. Эти четверо ребят уже были на заметке у преподавателей — хорошие преподаватели их любили, а плохие боялись, поскольку они брали интегралы, объявленные неберущимися в некоторых специальных геофизических монографиях, решали уравнения, также числившиеся среди неразрешимых.

"Задавал, конечно, тон в этой четверке лидеров Андрей, который был явно из интеллигентной семьи и уже тогда читал на трех языках (английский, немецкий, французский). Он обладал наибольшей начитанностью, кругозором и чуткостью, но был чрезвычайно раним и, как следствие, иногда избыточно щепетил. «Конвенция», висевшая на стене в их комнате общежития на Шкиперке, была явно составлена им и введена по его инициативе. Я не вспомню сейчас из скольких пунктов она состояла, но в ней точно были следующие: 1) запрет или, по крайней мере, ограничение на употребление матерных выражений — полагался штраф; 2) курение в коридоре, а не в комнате — последнее, по-моему, позволялось лишь в случае вечеринок и появления курящих гостей; 3) ограничение на включение радио.

По его же инициативе не только все



ребята, входившие в эту четверку, но и все жившие в комнате, а впоследствии и в соседних, обращались друг к другу на "Вы". И когда я стал их частым гостем и собеседником, то Андрей, видя, что я привык к более простому обращению (на ты), мне сказал: "Костя, Вы не подумайте, что мы обращаемся к Вам "на Вы" по причине официальности наших отношений. Это потому, что мы Вас уважаем" (из воспоминаний старшекурсника, а впоследствии ученого-математика, директора Института инновационных технологий СПб, Константина Викторовича Мануйлова).

Андрей участвовал в работе студенческого научного общества, Совете молодых ученых ЛГИ, Ленинградского общества естествоиспытателей. Докладывал на ленинградских студенческих, общепитетутских и факультетских научно-технических конференциях "К теории поверхностей второго порядка" (1969), "К вопросу о динамике магнитоупругих сред" (1970), "Ин-

версия — как элементарный принцип симметрии" (1970); принимал участие в организации совещаний "Симметрия в природе" сначала как слушатель (1970—1971), а в 1976 г. — как участник с докладом "О принципе динамической симметрии в геологии".

*"Сегодня целый день торчал в Публичной библиотеке, просматривая последние журналы по физике. Натолкнулся на несколько, уже проделанных в МГУ, опытов по изучению доменных структур ферромагнетиков способами, которые я очень хотел сделать сам. ... Мне все-таки хотелось бы получить математическое образование в пределах университетских программ. Дело в том, что просто не хватает времени. Придется, вероятно, учиться самому — составлять планы занятий, выработать жесткий распорядок дня, учет каждой минуты и пр.*

*По всей вероятности, практика моя пройдет где-то далеко от дома, пожалуй, что и в Казахстане. Профессор Шалаев,*

о котором я как-то упоминал Тебе в письмах, собирается послать меня в Алма-Ату, в вычислительный центр Казахского геологического треста, если только разрешит зав. кафедрой геофизических методов Логачев. Сейчас занимаюсь чем только ни придется: и распространением  $\epsilon$ /магнитных волн в слоистых средах, и динамикой упругого тела, и тензорной алгеброй, и ЭЦВМ и т. д. Перешел недавно на индивидуальный график, в связи с чем добавили несколько предметов: динамику упругого тела, вариационные исчисления и ЭЦВМ. Недавно только сдали зачет по теории функций комплексной переменной — курс, в общем-то, непростой, чтобы одолеть его в несколько дней. На днях будем сдавать I часть тензорного анализа. Чтение II части давно уже начато — на уровне где-то книги Рашевского «Риманова геометрия и тензорный анализ». Вариационное исчисление начнут читать где-то на днях (еще не решено на заседании кафедры математики). Слушателей набрали и среди аспирантов, помимо студентов-геофизиков и горного факультета по специальности «Физика горных пород».

Учебная практика состоится в пригороде Ленинграда, пос. Кавголово, находится в 30 км от города. Там — своя институтская «дача», в которой предполагается прожить до середины июня месяца. Затем — производственная преддипломная практика — бог знает где она состоится. Вначале предполагал, что в Алма-Ате, в Вычислительном центре при Казахском геофизическом тресте, зав. кафедрой отклонил в сторону саму возможность об этом думать — ехать туда мне категорически запретили по той причине, что я — не математик — горный инженер-геофизик."

На преддипломную практику Андрей был направлен в Небитдагскую Комплексную геолого-разведочную экспедицию Управления геологии Туркменской ССР. Работая в камеральной партии над пятилетним отчетом, Андрей получил возможность анализа фактического материала большо-

го региона, в который он углубился с головой.

"... я не жалею, даже более того, — рад, что такими судьбами попал сюда. Там вряд ли дали бы мне возможность работать, думать спокойно и без излишней суеты, поспешности. Ты не поверишь, но это так: я никогда еще в своей короткой части жизни не думал. И никогда еще не доходила до меня мысль, — что значит думать? — в такой, по крайней мере, сейчас, ясности. И с другой стороны, я все более и более становлюсь геологом, точнее, тектонистом, и еще более точнее — геотектонистом.

На примере Туркмено-Хорасанских гор, при тщательном изучении их тектоники и палеогеографии, при сопоставлении с другими геологическими объектами (горными системами, платформами и пр.) все более и более убеждаюсь в том, что все явления в геологической жизни не только могут, но и должны объясняться с точки зрения симметрии геотектонических явлений; последняя — есть источник нарушения изостатического равновесия земной коры в определенных зонах. Жизнь Земли — это не что иное, мне кажется,



как постоянная борьба противоположных начал — тенденций к равновесию и тенденций, нарушающих его. Последняя имеет в качестве своего источника тектонические усилия, носящие глобально (не локально, не обязательно во всех точках земной поверхности) симметричный характер. На примерах образований Туркмено-Хорасанских гор, Каспийской впадины, Центр.-Каракумского свода и т. д. я хочу показать справедливость принципа симметрии в своей дипломной работе. Тем более, что эта идея не явно, но вырисовывается в работах почти всех сколько-нибудь мыслящих исследователей. Материала в геологии накопилось уже в достаточной мере, чтобы идея симметрии в геотектонике не оказалась просто гипотезой. И более того, зачатки этой идеи были высказаны гипотезами и Канта, и Лапласа, и Шмидта, но, к сожалению, эти принципы они оставили исключительно для этапов зарождения Земли. Должен заметить, в известном смысле не имеет значения, — чья гипотеза об образовании Земли и других планет Солнечной системы верна. Главное и существо дела в том, что метафизический взгляд (по сути дела — религиозный) на Землю был противопоставлен диалектическому, т. е. такому, который рассматривает, в частности, земную материю, развивающуюся, переходящей из одной формы в другую в процессе постоянного и неизменного развития и движения. Но еще раз повторю, верная идея предполагалась верной для определенного лишь этапа жизни земной материи — начального. А что же дальше? А дальше — ничего. Точнее, так: исследовательская мысль геологов смотрела с другого конца, с того, с которого легче смотреть. Дальнейшее развитие идей Канта, Лапласа, Шмидта и др. на определенном этапе развития геологической науки не получило продолжения, т. к. не было воспринято в них того рационального, верного, что называется диалектикой, развитием. По сути был просто вырван кусок и поставлен в стороне для обозрения восхищенной, а то ча-

сто и сомневающейся, копающейся в деталях и прочей публикой, под музейное стекло. С другой стороны, Ты знаешь из Шафрановского И. И., что одним ленинградским исследователем была подмечена приуроченность новейших тектонических движений к зонам, расположенным симметрично к географическим полюсам, причем на так называемых, критических параллелях. Обобщая все сказанное и говоря языком математической физики (и теоретической физики в смысле, изложенной Ландау и Пятагорским (см. введение в «Теоретическую физику», т. 1, Механика, 1940)), можно сказать так.

В геологической науке в отношении Земли (и не только Земли!) не составлены зависимости между физическими величинами. Правильнее было бы сказано так, учитывая чрезвычайную сложность геологических процессов: не составлены зависимости между величинами, характеризующими тектоническую деятельность (процессы) Земли и некоторыми другими физическими величинами, имеющими несомненный, по крайней мере локально симметричный характер. Разумеется, что никакому умнику не придет в голову фактически составлять такие уравнения. «Слишком точные вычисления с учетом несущественных факторов не только бесплодны и излишне усложняют результат расчета, но могут даже привести к тому, что существующие в данном явлении закономерности вообще выпадут из рассмотрения. Дело в том, что приближенным может оказаться не только данный конкретный вид закона, но и само существование функциональной связи между характеризующими данное явление величинами, и за пределами данной точности эти величины могут встречаться в произвольных комбинациях» (Ландау, Пятагорский, «Механика», 1940). Гипотезы Канта, Лапласа, Шмидта в этом смысле рассматриваются, по-прежнему, как гипотезы, но уже рабочие, причем, как начальные условия для «решения соответствующей задачи мат. физики» (см. там же — в конце введения).

Задача же теоретической физики ставится, исходя из задания достаточно большой массы (для выполнения шаровой симметрии) пластического тела, находящегося под действием осесимметричного поля. Требуется определить поле напряжений и деформаций (для пластического тела — перемещения). Переходы же «из одного состояния в другое», равно как и постепенные, непрерывные, усматриваются как заданные в условии задачи и не более. В этом и состоит идея метода, которым я собираюсь воспользоваться для анализа геологической (тектонической, в частности, прежде всего) истории Туркмено-Хорасанских Гор (Туркмения, Иран, Афганистан, Узбекистан, отчасти Казахстан), а также Кавказа и Притуриной впадины.

Должен заметить, что появилась небольшого размера статья Уилера «Предвидение Эйнштейна» — великолепнейшая из работ, которые когда-либо мог я увидеть. Ясность, четкость, исключительная принципиальность, идейность, в то же время и ее высокая духовность, эмоциональность — вызвали у меня в высшей степени невероятный подъем и небывалое желание продолжать изучение римановой геометрии.

В то же время я прочел книжечку нашего профессора Шафрановского И. И. «Симметрия в природе». Настоятельно прошу Тебя прочесть ее. В высшей степени поэтическое произведение! Я получил огромное удовольствие и в то же время она вдохновила меня на дальнейшие, более серьезные, занятия. «Симметрия» Вейля Г. способна увлечь, но не вдохновить. В своей книжке, в частности, он разбирает вопрос о криволинейной симметрии, идея которой принадлежит, как оказалось, тому же — нашему, но академику Наливкину Д. В. Эта симметрия была им отмечена в животном мире — в ракушках и прочих рыбешках. Но глубина его мысли ушла дальше ракушек.

... Значение криволинейной симметрии состоит в том, что она отражает какие-то скрытые от нас движения, раз-

витие, а стало быть, и диалектику. А смысл ее заключается в том, что физически — в движении, философски — в развитии, в диалектике, математически — в соответствующих геометриях, в движениях, вращениях (собственных, несобственных), она носит принципиально элементарный и инвариантный (к чему-то) (внутренне!) характер. Внешне она (симметрия) проявляется как криволинейная. В качестве примера я приведу дальнейшее развитие идеи симметрии в горообразовании (а элемент, как будем и называть, принцип горообразования вскользь описан у Шафрановского И. И.): Палеонтологические, палеогеографические, а также палеомагнитные исследования показали, что географические, а вместе с ними и геомагнитные полюса постоянно совершали перемещения, причем весьма значительные. Фиксированное положение на Земной поверхности географических полюсов обуславливает тип симметрии  $L \infty \in ПС$ , что накладывает существенный отпечаток на характер тектонических и горообразовательных движений и процессов, внутренняя причина которых, кроме одной, — вращения Земли вокруг своей оси — интересоваться здесь нас не станет. Данный тип симметрии именно обуславливает широтное распределение указанных процессов — возникают «широтные расположенные горы». Это имеет место в каждый фиксированный момент времени. Перемещение же во времени географических полюсов, если угодно, — создало такую сложную систему горных хребтов и т. д., которую видим мы на наших картах.

Я все-таки не покидаю надежды заняться когда-нибудь проблемой динамической симметрии в геотектонике. Когда-нибудь осилить теорию упругости, теорию пластичности и доказать, что существуют критические параллели (параллели экстремумов напряжений и деформаций) и существует полнейший детерминизм в горообразовании, объяснение которого лежит в механике нашего небесного тела. Когда вспоминаю об этой

проблеме, мои текущие проблемы и задачи кажутся такой мелочью и пустяком, что стоят ли они этого? Хотелось бы, очень хотелось бы поговорить с человеком, понявшим одновременно бы и мою идею, и меня.

Очень здорово, что здесь я поправляюсь в своем здоровье. Головные боли исчезают и появляется уверенность в своих силах. Самое большое благо человека — здоровье в самом широком смысле этого слова: не просто не болеть, не немогать и пр., а именно быть здоровым и телом, и духом. В этом отношении древние греки уловили самое существенное и главное. Все остальное — производные.

Живу сейчас в Туркмении, в Небит-Даге. Среди пустынь, под ярким и жарким солнцем. Работаю техником-геофизиком в камеральной лаборатории опытно-методической сейсмопартии. Угадается тайком заниматься. Сейчас читаю Рашевского. Ты знаешь, у меня создается впечатление, что изучать физику, не изучив основательно геометрию, — не чувствовать физику как нечто «физическое», реальное. В противном случае, неудовлетворенный геометрическими абстракциями ум ищет в физике «колдовство», не различая конца чисто, подлинно физического и начала чистейшей воды умозрительных идеальных математических, геометрических и прочих построений. Осознав четко то и другое — значит, осознать единство и борьбу противоположностей в теоретической физике, значит до конца остаться в физике реалистом (физика и реальность!). Обнимаю, с желанием наконец-то встретиться с Тобой, Твой покорный слуга Андрей. P. S. Наверное, в будущем году женюсь. Вот тогда Ты должен будешь непременно приехать в Ленинград."

После защиты диплома в 1972 г. Андрей начинает работать инженером научно-исследовательского сектора Ивано-Франковского института нефти и газа. Работая над теорией линейных систем преобразований в сейсморазведке, он продолжает интересоваться вопросами "большой геотектоники":



"Большое спасибо за книгу Камке Э., а также полученное ранее письмо. Сейчас уже уселся за Камке Э. Но все же вспоминаю Эльгольца Л. — его предельную лаконичность и простоту изложения. Хотя Камке Э., конечно, более «полная монография». ... Мне известны только две работы, относящиеся к вопросу о связи горных систем с параллелями максимальных напряжений. Это работа Б. Л. Мячкова «К основам современной теории Земли», изд. ЛГУ, 1965 и М. В. Стоваса «К вопросу о критических параллелях», Автореферат, Л-г, 1951. В этих работах заложены те основы, к которым я в свое время пришел независимо от них. На днях я переверну все реферативные журналы и, насколько это возможно, получу более полное представление о сделанном в этом направлении. По крайней мере, будучи знаком с содержанием всех номеров журнала "Физика Земли", мне думается, что этот вопрос (см. выше) не получил еще должного развития.



За дні моєї «болізни» прочав «Теорію упругості» Ландау Л. і Лифшица Е., а також Амінзаде Ю., розібрався з полученням для еліпсоїда вращення рішенням задачі о деформации і напруженні в результаті вращення еліпсоїда вкруг осі його осевої симетрії (Лурье А.).

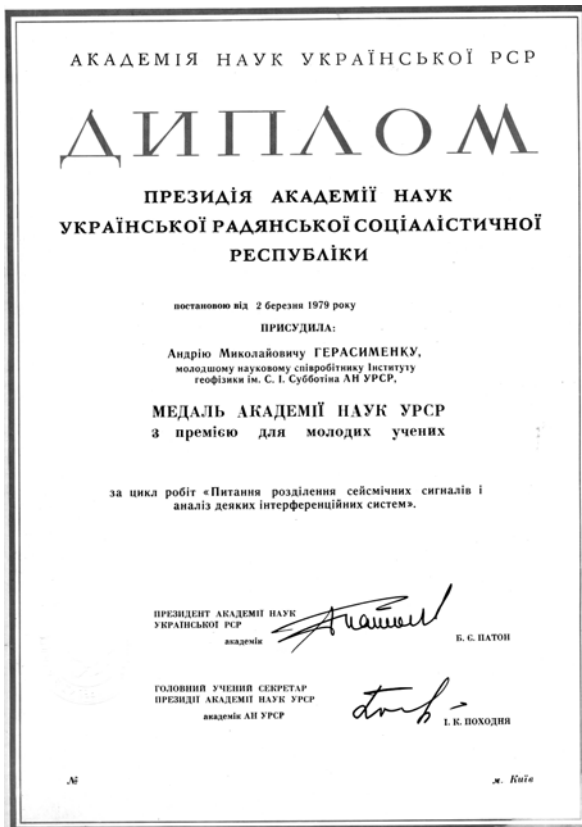
Максимум модуля вектора смещення приходить по предварительній численній оцінці приблизително на  $50^\circ$  северних і южних широт (в географічних координатах), що совпадає для сев. широти с положенням Альпійско-Гімалайської горної системи. Вопрос в цілому о фізико-механічеської моделі геотектонічеських процесів вельма сложен, главным образом, вслідствие явленій «пам'яті» деформіруємої пластичної середі, виражаємої в упрочненні пластичного тіла в результаті деформации, в формуванні неоднородностей теплових потоків і впливнн їх на фіз.-хім. свойства горних порід (динамометаморфізм) і т. д. і т. п. і наложєнні результатів

текуєї діяльності (деформации с не-обратимими послєдствиями) на результати предидущих. Первый шаг в таких исследованиях должен состоять из простейших допущєний і извлєчєнні всех следствий из них с послєдующим усложнєнієм модели і увеличєнієм числа допущєний (параметров модели).

Для упругої моделі Землі получается, что при любых угловых скоростях  $\omega \neq 0$  вращєнія максимум модуля вектора смещєнія находитсє на одной і той же параллєлі, т. е. являєтсє постійною величиною по отношению к углової скорості. Зависит эта постійная (значєніє широты) только от коэффициента сжатия эллипсоида і коэффициента Пуассона. Остаетсє поэтому предположить, что і в другие времена (геологическіє) с точностью до упругої моделі значєнія критических параллєлєй для любых осєй вращєнія оставались те же. Этот результат я получил негавно. Необходимо исследовать напруженія і деформации в главных осях і сдєлать заключение по поводу «сопроматного» поведєнія среді, в частности получить направления линий возможных сколов (линий Чернова). К сожалєнію, оказываєтсє невозможным пока что-либо сказать о главных осях, т. к. ничего не могу сказать о корнях известного кубического уравнения для нахождения главных напруженій. А именно, корни кубического уравнения необходимо расположить в порядке их возрастания: т. е.  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . А зная этот порядок і направления соответствующих им главных осєй, можно двигатьсє дальшє."

В это время Андрей работал над циклом статей совместного раздєления сигналов в сейсмических записях, приемно-излучающих і интерференционных систем в сейсморазведке МОВ, кинематического принципа взаимности в сейсморазведке МОВ і МПВ, опубликованных в 1977 г. в "Геофизическом сборнике" Института геофизики АН УССР [Герасименко, 1977, вып. 75—78].

В 1976 г. Андрей поступил в аспирантуру Института геофизики им. С. И. Суб-



ботина АН УССР к научному руководителю Всеволоду Борисовичу Соллогу. Он опубликовал статьи о системах формирования сейсмических изображений, теории сейсмической голографии. За цикл теоретических работ "Вопросы разделения сейсмических сигналов и анализ некоторых интерференционных систем" в 1979 г. Президиумом АН УССР Андрей Николаевич Герасименко был награжден именной медалью Академии наук и премией по итогу конкурса молодых ученых за 1978 г.

*"В комнате в общежитии живу сейчас сам. Работаю поэтому, никуда не выходя, разве что в институтскую библиотеку. Два раза в неделю — английский; два раза в неделю — физкультурная группа "Здоровье". Привез с собой лыжи, осталось купить ботинки, — и это будет еще три раза в неделю. Так что в итоге — 7 дней — период циклов гармоничного духовного и физического развития моей собственной личности. Занимаюсь сейчас принципом взаимности: оказалось, что еще в 30—40 гг. были созданы теоретические основы моей диссертационной работы в виде формулы Грина—Вольтерра — аналога известной интегральной формулы Грина—Остроградского. В 60-х гг. было показано, что из формулы Грина—Вольтерра вытекает принцип взаимности для динамических уравнений теории упругости. Сейчас этой формулой, как из пушки, стреляют по воробьям. Не попадались для нее более достойные цели. Однако только после того, как я обнаружил эту формулу Грина—Вольтерра, мне удалось все расставить по полкам, в частности дать все необходимые определения предмету своего исследования — бинарной сейсмической голографии. Самое интересное то, что так называемая бинарная сейсмическая голография, точнее ее принципы, действуют независимо от типов волн в среде, т. е. действуют для любых типов волн в среде с производным строением, т. к. при выводе принципа взаимности никаких ограничений на тип волны и сред не накладывается.*

*Пожалуй, только за эти последние прошедшие недели у меня четко сформировался план моей работы, о которой я уже представляю себе содержание каждой главы, вплоть до ее разделов и пунктов. Формула Грина—Вольтерра, на которую я так уповал, свои надежды оправдала. Правда, не в такой форме, как я вначале ожидал. Я полагал, что все необходимые следствия получу из этой формулы. Оказалось, что когда я добрался до формулировки нужных мне следствий, справедливость формулы Грина—Вольтерра является лишь необходимым условием. Все-таки, зная приблизительно то, что мне нужно было доказать, и узнав, что формула Грина—Вольтерра лишь необходима, уже было нетрудно заметить условия достаточности, на формулировки которых не жаль было потратить столько времени, сколько нужно. В общем-то, работа кажется пока стройной, обоснованной, испещренной пронумерованными определениями, именами, теоремами и утверждениями, всеми необходимыми ссылками и кивками, любезностями и реверансами. Впереди маячит для меня самое трудное: уже вскоре придется переходить к составлению алгоритмов решения тех задач, которые возложены на систему, громко именуемую себя бинарной сейсмической голографией. На это уйдет все золотое времечко.*

*... Хотя жаль, что не придется нам увидеться в Киеве, так как уже на днях должен ехать в экспедицию. Когда я был в Ивано-Франковске, то оттуда в Киев переезжал велосипед. И теперь, правда, имею хорошее и сносное утешение. Здесь, недалеко отсюда, — большие лесные массивы. Они видны даже с окна общежития. Сосны, дубы, березы. А сейчас там — ландыши. Каждый день перевожу их огромными букетами и наслаждаюсь их свежестью.*

*В последнее время здесь, в Институте, было несколько интересных семинаров по сейсморазведке. Одно из них с участием Тимошина Ю. В. и другое — Пузырева Н. Н. Жаль только, что они слишком редки. Работа моя в целом продвигает-*

ся. Общие места уже в основном закончены и в целом ясны. Перехожу на рельсы теории изображений. К сожалению, обнаружил, что сделанная еще в Ивано-Франковске теория изображений будет выполнять лишь иллюстративные функции. Она довольно красива, но уже постарела. Я ей дал название: интерференционная теория изображений бинарной сейсмической голографии. Она чересчур классическая и толку от нее будет мало. Помимо этого я обнаружил еще одну возможность построения теории сейсмических изображений в бинарной сейсмической голографии. Она состоит в том, что из двух сейсмических записей, получаемых на квазивзаимной бисистеме, я составляю один-единственный объект — функцию  $\tilde{R}(\Delta\delta, \Delta\delta, t)$ , описывающую пространственный спектр сразу двух сейсмических записей и полностью характеризующую волновую картину для обеих приемных баз квазивзаимной бисистемы. От функции  $\tilde{R}(\Delta\delta, \Delta\delta, t)$  можно путем соответствующих интегральных преобразований переходить к получению сейсмических глубинных разрезов (как для отраженных, так и преломляющих волн). Назвал я пока эту теорию — спектральной теорией сейсмических изображений и за нее придется мне держаться. В интерференционной теории, как оказалось, ее построение зависит от знания функций источников излучения, а это практически трудно узнать. Построение спектральной теории не базируется на знании источников и поэтому в практическом отношении интересна."

Летом 1976 г. Андрей работал инженером камеральной партии сейсмической экспедиции Института геофизики им. С.И. Субботина АН УССР.

"В Великих Сорочинцах я уже почти полтора месяца. Время бежит быстро, незаметно. Места здесь все очень живописны, в типично малороссийском духе. Речка, леса. Захватил с собой велосипед. И поэтому могу объезжать все окрестности Великих Сороченцев. Уже ездил несколько раз в Гоголево, один раз — в Мир-

город. В основном ездю по лесам за цветами. Здесь такие цветы, которые я нигде и нигде не видел. А их я перевидал довольно порядочно, особенно в Карпатах и в окрестностях Ивано-Франковска. Под Киевом — только ландыши и барвинки, т. к. в лесу был только весной.

Ликвидация работ произойдет в конце сентября. К этому времени я буду в Киеве и, видимо, наверняка, т. к. необходимо будет доставить туда свои вещи, а также оформить командировку в Ленинград (на совещание по симметрии в геологии).

За все это время, которое я провел в Вел. Сорочинцах, завершил почти в полном объеме теорию систем бинарной сейсмической голографии, хотя негоденок еще порядочно и между тем совершенно нет желания их устранять. Переходить к следующей части работы — к прикладным аспектам — абсолютно еще не готов. Поэтому решил все это дело забросить на недельку две и последние дни все мотаюсь на своем транспорте по здешним лесам. Вчера удалось даже насобирать грибов — белых. Видел лису. Представляешь себе, она перебежала через сваленное поперек реки дерево, огромная и огненно-рыжая. Я подумал вначале, что это была собака какой-то необыкновенной породы. А еще я видел вчера развешанные на орешнике грибы, не какие-нибудь, а белые, что привело меня в полнейший транс и шок. Говорят, что этим занимаются белки, готовясь к зиме. В конце концов, я вчера так увлекся, что совершенно заблудился. Точнее, быстро наступила темнота (а в лесу ведь еще темнее) и я постоянно натыкался то в какой-то пруд, то в болото, то на пески (а с велосипедом тягаться по песку — одно наказание). Насилу к часам 9—10 вечера удалось выбраться в поле, а затем и к дороге.

Сегодня снова поехал в то же место и — ни одного грибочка. Причем едва оттуда выбрался. Хотя леса здесь действительно очень живописны. Большое количество прудов в лесах создает какой-то неповторимый и именно этим очень ха-

рактёрный облик здешних мест. Когда гуляешь по этим лесам, то не станешь удивляться — ибо это так естественно — русалкам, чертям, водяным и прочей нечисти, которыми так изобилуют ранние произведения Гоголя. Они, все эти пруды, болотца, — такие заросшие и заброшенные, кажутся чересчур тихими, слишком тихими. И слишком они такие заросшие и зеленые, с подозрительно спокойной и темной водой. А вообще, я никогда, оказывается, не представлял себе верно природу Украины в целом. Я судил о ней по Карпатам, где я провел свое детство, и по Николаевской (и соседним к ней) областям, где я очень часто бывал (тоже, в основном, в детстве). И когда ехал сюда, то не очень доверялся, откровенно говоря, впечатлениям тех, кто здесь бывал уже. В лучшем случае я ожидал увидеть что-то вроде степей Николаевской, Херсонской или Одесской обл. Но здесь все намного колоритнее. И природа, и люди (мне даже хотелось бы сказать — а, следовательно, и люди).

Знаешь, Андрей, я очень хочу попросить Тебя об одном одолжении, очень потому, что потом будет просто поздно. Сейчас вышли книги, которые мне нужны позарез. Но я в Киеве оставил адреса магазинов "Книга-почтой" и ничего не могу заказать. Очень прошу Тебя: напиши заказы на книги (названия их — на отдельном листке) и вышли их по адресам."

Переписка с Андреем Снарским зачастую превращалась в дискуссию по самым разным вопросам физики и математики. В 1976 г. Андрей пишет:

*"Добрый день, Андрей!*

*Сегодня получил уже второе Твое письмо. И откладывать ответ уже некуда, поэтому собираюсь с духом (в соответствии с правилом К. Прутков: Принимаясь за дело, соберись с духом!) и сажусь писать. Говорить есть о чем. Но прежде начну со своих долгов и, в частности, о спиральном тензорном поле. На следующий день после нашей последней встречи я тотчас же просмотрел некоторые варианты и остановился на одном, наи-*

*более простом и допускающем компактные записи варианте. Вопрос, как я понимаю, состоит в том, чтобы описать такое тензорное поле, одна из главных осей в каждой точке которого совпадает с касательными к спиралям в тех же точках. Вторая главная ось ортогональна к первой. Иначе говоря, следует разыскать такую ортогональную криволинейную систему координат, в которой одной из семейств осей является семейство спиралей, а второе семейство надо, собственно, разыскать. Задать систему координат — значит задать метрический тензор и наоборот."*

Осенью 1978 г. Андрей представил в спецсовет по защите диссертаций Института геофизики АН УССР диссертацию "Продолжение геометрических инвариантов в задачах сейсмической голографии" [Продолжение ..., 1979]. После обсуждения на Ученом совете одним из оппонентов был предложен Б.Я. Гельчинский, профессор кафедры геофизики геологического факультета Ленинградского университета. Б.Я. Гельчинский дал согласие на оппонирование, но вскоре, в связи с предстоящей эмиграцией, он был уволен из ленинградского университета и уже не мог выступать в роли оппонента по защите диссертаций. Он обратился с просьбой оппонировать работу Андрея к своему учителю Г.И. Петрашню, который дал согласие. Весной 1979 г. состоялась доброжелательная встреча диссертанта и оппонента, дата защиты была назначена на 19 ноября 1979 г.

Нельзя не упомянуть о возникшей дружбе выдающегося математика-геофизика, создателя "лю-модели" распространения сейсмических волн Бориса Яковлевича Гельчинского с Андреем. Казалось, эти два человека давно знают друг друга. В аудитории университета и дома у Бориса Яковлевича, не замечая времени, они обсуждали самые сложные вопросы геофизики, легко, с уважением относясь к собеседнику. Андрей рассказывал, что его удивил быт, в котором жил Б.Я. с дочерью — в одной комнате коммунальной

квартиры, разделенной фанерной стеной. И абсолютное равнодушие к этому профессора Б.Я. Гельчинского.

Когда до защиты диссертации оставалось несколько месяцев, Андрей получил от Г.И. Петрашеня письмо о возникших у него сомнениях выбора в диссертации математического аппарата римановой геометрии с предложением другого подхода к решению задачи. Андрей, прилетев в Ленинград, на встрече с Г.И. Петрашенем убедительно доказывает, как ему казалось, целесообразность предложенного метода. Они тепло расстались, но за несколько дней до защиты в спецсовет приходит письмо Г.И. Петрашеня с полным разгромом диссертации. Отзыв Г.И. Петрашеня источал такую силу, как будто шла борьба между двумя враждующими кланами или научными школами, а не давалась оценка кандидатской диссертации. Скользившие между строк фразы вроде: "В главе 1 нет принципиально новых результатов ..., однако приведенные формулы, связывающие геометрические параметры фронтов с составляющими первого и второго фундаментальных тензоров, оказываются полезными, что и демонстрируется во второй главе"; или "в главе 2 получены новые результаты, представляющие бесспорный интерес сейсмологи", терялись в потоке много раз повторяющихся фраз о "некомпетентности автора", о "грубо-ошибочных утверждениях, недопустимых в диссертации" и т. д. и т. п. Оппонент демонстрирует свое видение решения задачи, показывая "элементарный вывод уравнения переноса", правильный, но другой. "Для получения уравнений переноса совсем и не требовалось прибегать к специальному аппарату римановой геометрии и тензорного анализа, более громоздким, чем обычные для сейсмологии подходы. Применение такого аппарата подобно стрельбе из пушек по воробьям: сложно, громоздко и мало эффективно".

Андрей не поверил, что это написал Г.И. Петрашень. Более того, он рвался в процессе защиты представленной им диссертационной работы доказать целесооб-

разность направления, еще не получившего развития в геофизике, также, как он доказывал это Г.И. Петрашеню при встрече. Спецсовет принял решение об отсрочке защиты диссертационной работы А.Н. Герасименко, опасаясь преобладающего голоса оппонента — ученого с мировым именем — на решение ВАКа. С.В. Гольдин писал впоследствии: "... Обилие специалистов, вовлеченных в решение задачи продолжения кривизны вдоль луча, ... имело и свою негативную сторону — каждый из них привнес свою терминологию, свой частный метод, свою систему понятий. Это не Вавилонская башня, но что-то близкое к ней. Не случайно, одна и та же система уравнений имеет столько различных модификаций, которые не так-то просто сопоставить" [Гольдин, 1983]<sup>2</sup>.

Андрей не изменил подхода к решению задачи. Весь следующий 1980 г. он перепроверяет полученные дифференциальные уравнения и характеристики волновых фронтов вдоль произвольного луча в среде с кусочно-регулярным изотропным полем скоростей. Оттачивает формулы закона восстановления и отражения-преломления для тензорных характеристик полей времен лучевых трубок гладких поверхностей раздела произвольной формы, позволяющие разделять среды с произвольно регулярными скоростными функциями. Стремится, согласно формулировке американского физика Д.У. Гиббса "отыскать ту точку зрения, с которой изучаемый предмет представляется наиболее простым", все более убеждаясь в открывающихся возможностях использования аппарата тензорного анализа и римановой геометрии для получения результатов в инвариантной форме, удобной для использования на ЭЦВМ.

Защита диссертации "Продолжение геометрических вариантов в кинематичес-

<sup>2</sup>Гольдин С.В. О книге А.Н. Герасименко "Лучевой метод в геометрической сейсмологии сложно-построенных слоистых сред". *Геофиз. журн.* 1983. Т. 5. № 5. С. 93—94.

ких задачах сейсморазведки" состоялась в мае 1981 г. [Продолжение ..., 1981] Оппонировали диссертацию Сергей Васильевич Гольдин и Виталий Николаевич Пилипенко. В спецсовет пришли позитивные отзывы с разных геологических организаций Союза — д-ра техн. наук Ю. В. Тимошина, канд. физ.-мат. наук В. И. Романа (УкрНИГРИ), канд. техн. наук В. А. Дядюры, канд. техн. наук Е. Л. Цацко (ОМГЭ ПГО "Укргеофизика"), канд. физ.-мат. наук А. И. Кобрунова (ИФИНГ Ивано-Франковск), канд. техн. наук А. Н. Левина (НПО Нефтегеофизика, Нарофоминск), д-ра техн. наук В. А. Падукова (Горный институт, Ленинград), канд. физ.-мат. наук В. А. Цехохи, канд. физ.-мат. наук В. А. Шарафутдинова (вычислительный центр ИГиГ СО АН СССР, Новосибирск), канд. физ.-мат. наук Р. В. Тедеева, канд. геол.-минер. наук С. В. Клушина (Бел НИГРИ).

После защиты диссертации Андрей работает над монографией "Лучевой метод в геометрической сейсмике сложно-построенных слоистых сред". Углубляя задачу продолжения вторых производных эйконала вдоль луча, начатую еще в 30-е годы акад. В. А. Фоком и Ю. В. Ризниченко, Андрей "показывает внутреннюю присущность языка римановой геометрии кинематической картине лучей фронтов в сложной среде" [Гольдин, 1983]: стремясь "изложить ход решения задачи в чрезвычайно простой форме" (из отзыва В. А. Падукова). Вспоминается реакция Виталия Николаевича Пилипенко на только что вышедшую в трагическом августе 1982 г. книгу Андрея: "С этими формулами можно работать!".

Оппонент диссертационной работы Сергей Васильевич Гольдин отозвался на книгу Андрея статьей в "Геофизическом журнале": "А. Н. Герасименко подошел к указанной проблематике — вычисления кривизн фронта сейсмической волны в неоднородной среде ..., занимаясь задачами продолжения волновых полей. Он обратил внимание на то, что ядра дифракционных интегралов френелевского типа определяются квадратичными аппроксима-

циями фронта сейсмической волны, т. е. вторыми производными эйконала. Среди известных нам специалистов только немецкие геофизики П. Хубрал и Т. Крей были в то время близки к этим идеям. Очень быстро А. Н. Герасименко понял значительно более широкое значение рассматриваемого круга задач для развития теории сейсмических методов, занимаясь ими в максимально возможной общей постановке.

Основная научная заслуга А. Н. Герасименко состоит в том, что он систематически исследовал данный круг проблем на основе наиболее общего и, по-видимому, наиболее адекватного языка римановой геометрии. Фактически в рецензируемой книге, увидевшей свет уже после безвременной смерти талантливого молодого ученого, изложена вся геометрическая сейсмика (с акцентом на задачах продолжения вдоль лучей характеристик второго порядка) с точки зрения фундаментальных понятий дифференциальной геометрии и тензорного анализа.

В терминах римановой геометрии теряется формальное различие между геометрическими сейсмикой, акустикой, оптикой, а в некоторых отношениях — и теорией относительности. Более того, оказывается, что целый ряд относительно трудных результатов, который был получен в каждой из упомянутых наук, является частным следствием из давно известных фактов более общей геометрии. Как это оценивать? Да только так, что развитие науки есть живое дело, а не мертвая схема. Каждая наука идет своей дорогой — со своим кругом задач и своим классом моделей сред. Вначале эти модели были просты, и надобности в более общем языке просто не было. Но по мере неизбежного усложнения задач и моделей наступил такой момент, когда стал необходим пересмотр понятий с более широких позиций при более полном взаимопроникновении различных областей знаний. В этой ситуации становится весомой роль специалистов, которые могут переложить задачи своей специальной области зна-



ний на более общий язык. Таким специалистом и был А. Н. Герасименко.

... Несомненно, книга А. Н. Герасименко в яркой степени отразила тот качественный скачок, который совершила теоретическая сейсмика во второй половине 70-х годов в связи с решением основных проблем лучевого метода (в широком понимании этого термина)".

Сергей Васильевич Гольдин упоминает о книге А. Н. Герасименко в книге "Введение в геометрическую сейсмику" [Гольдин, 2016, раздел 4, с. 148]<sup>3</sup>.

Том "Геометрическая сейсмика" С. В. Гольдина, готовящийся к изданию Институтом геологии и геофизики СО РАН в электронном виде в январе 2018 г., посвящен украинскому геофизику Андрею Герасименко по завещанию автора.

"... Ушел из жизни и остался рядом с нами рыцарь добра, чести, интеллекта, красоты, самой сильной страстью которого было самоотверженное служение на-

уке" — написала Нелли Федоровна Познанская в 1982 г. "Первые встречи с аспирантом Андреем Герасименко принесли ощущение чего-то странного, необычного: напряженные занятия, курение, чай, самоуглубленность, отъединенность от сиюминутного. Большой, сильный, мужественный человек с доброй, застенчивой улыбкой внешне выглядел по-разному: от решенно, спортивно-демократично, иногда неуклюже, порой элегантно. Но всегда бесконечно увлеченный работой профессионал и вместе с тем скромный, отзывчивый человек, любящий жизнь во всех ее проявлениях.

Похоже было, что преодолевая известные аспирантские барьеры (семинары, рефераты, экзамены, статьи), он ставил себе задачи более общие, высокие, трудноразрешимые. Работал Андрей неистово, упрямо, закладывая основы своего пути в науке. Энергично выступая на семинарах, он умел поразительно четко проникнуть в суть вопроса, представить его затем в различных аспектах, определить способы решения, осуществить его, наметить пути применения. Все это требовало настойчивой систематической работы не только в избранной им области теоретической сейсмики, но и в необходимых разделах математики (векторный и тензорный анализы, топология), и физики (оптика, механика сплошных сред, волновые процессы). Он побеждал время огромным трудолюбием, целеустремленностью, но подводило здоровье. И все же был всегда подтянут, в форме, шутил. Широкая образованность, мягкость, воспитанность, интеллект и безмерная доброта — вот что привлекало самых разных людей к Андрею. Его интересовало многое: физика, математика, геология, кристаллография, история, политика, литература, языки, живопись, скульптура, музыка. Все это по-настоящему глубоко, продуманно, но без всякой позы, просто, естественно.

Помню разговор о "Зимней сказке" Гейне: еще с детства Андрею нравится сравнивать тексты оригинала и переводов,

<sup>3</sup> Гольдин С. В. Введение в геометрическую сейсмику. Новосибирск: Изд. ИНГТ СО РАН, 2016. 203 с.

отыскивая все новые нюансы и пласты бессмертного произведения, написанного кровью сердца поэта. Еще момент — звучит музыка Шостаковича. Лицо Андрея задумчивое, светлое: "Слышите, как идет время? Невероятно!". Совместное посещение выставки японской живописи. Где-то минут через 20 слова Андрея: "... картины как японские стихи-танки, когда поэт дает общую формулу, а дело читателей — раскрыть и понять ее. Это вдохновляет". И уж совсем неожиданное увлечение цветами ("душа просит"), украшающими рабочую комнату буйно, свободно, с размахом.

Казалось, этому человеку все легко: и экзамены, и работа, и неустроенность быта, и разлука с семьей. Только иногда прорывалось случайно: "Что-то болит голова, уже месяц; знаете, так трудно прервать работу; ведь ночью, знаете, как-то легче дышится, а спать днем некогда".

На обороте фотографии, подаренной в 1969 г., Андрей написал строки из поэмы Иоганна Вольфганга Гете "Фауст":

*"Где, времени кинув сквозную канву,  
Живую одеждуют кубожеству".*

*"... So schaffich am laufenden Webstuhl der Zeit  
Und wirke des Gottheit Lebendiges Kleil".*

Когда приехала семья, Андрей сразу успокоился: наконец, все вместе. Быт уложился из-за тесноты, нехватки денег, времени. Андрею все неважно, главное — надо "вкладываться" в детей. Он и здесь спешил: читал и фантазировал сказки, много занимался с детьми немецким и польским языками, незаметно приучая их к радостному, творческому труду.



Бывают семьи, где пахнет богатством, благополучием, — здесь был запах трудного счастья. Как хороши были семейные прогулки в лес на велосипедах! Как приятно было в уютном семейном кругу встречать гостей, беседовать обо всем на свете, угощать музыкой, пирогами! С открытой душой, тепло принимали хозяева и профессора, и пятилетнего мальчика. Семейные праздники — в тесноте, но трогательные, нестандартные, веселые, запоминающиеся надолго ..."

**Ольга Герасименко**



Список публикаций А. Н. Герасименко

- Бабий А. И., Кобрунов А. И., Герасименко А. Н., Панасенко В. Н. Определение расположения точек и линий геофизических наблюдений. В сб.: *Припятская впадина. Геологические результаты, методика и цифровая обработка геофизических исследований*. Минск: БелНИГРИ, 1974. С. 152—156.
- Герасименко А. Н., Веревкин Е. Е. К вопросу двойного преобразования РНП: *Материалы VI науч. конф. молодых геологов Белоруссии*. Минск: БелНИГРИ, 1976. С. 31—33.
- Герасименко А. Н. О спектральной оценке искажений результатов обработки сейсмических записей методом двойного РНП: *Материалы VI науч. конф. молодых геологов Белоруссии*. Минск: БелНИГРИ, 1976. С. 34—37.
- Герасименко А. Н. О принципе динамической симметрии в геологии. Сб.: *Симметрия геологических тел. Материалы Всесоюзного совещания*. Ленинград: ВСЕГЕИ, 1976. С. 20—22.
- Герасименко А. Н. О вопросе спектрального синтеза интерференционных систем для разделения сигналов в сейсмических записях. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1977. Вып. 76. С. 23—35.
- Герасименко А. Н. О принципе совместного разделения интерферирующих сигналов в сейсмических записях. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1977. Вып. 78. С. 62—66.
- Герасименко А. Н. Об использовании метода наименьших квадратов в задаче о разделении сигналов в сейсмических записях. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1977. Вып. 79. С. 62—66.
- Герасименко А. Н. Об обобщении принципа обратной фильтрации на пространственно-временные системы в сейсморазведке МОВ. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1977. Вып. 77. С. 67—71.
- Васильев Ю. А., Герасименко А. Н., Ганженко А. С. О разрешающей способности некоторых методов обработки сейсмических сигналов. В сб.: *Методы и устройства сбора и обработки измерительной информации*. Киев: Техника, 1976. С. 93—96.
- Васильев Ю. А., Ганженко А. С., Герасименко А. Н., Лизанец М. Г. К теории управляемых приемно-излучающих интерференционных систем в сейсморазведке МОВ. В сб.: *Новые результаты геофизических исследований на Украине*. Киев: Наук. думка, 1977. С. 65—78.
- Васильев Ю. А., Герасименко А. Н., Лизанец М. Г. Получение френелевских оценок разрешающей способности для сопряженных приемно-излучающих систем в сейсморазведке МОВ. В сб.: *Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений*. Вып. 14. Львов: Вища школа, 1977. С. 38—43.
- Герасименко А. Н., Лизанец М. Г. О получении френелевских оценок разрешающей способности методов обработки сейсмических записей. В сб.: *Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений*. Вып. 13. Львов: Вища школа, 1976. С. 38—43.
- Герасименко А. Н. О кинематическом принципе взаимности в сейсморазведке МОВ и МПВ. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1978. Вып. 82. С. 55—60.
- Герасименко А. Н. О кинематическом принципе бинарной сейсмической голографии. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1978. Вып. 84. С. 23—28.

Герасименко А. Н. О некоторых интегральных представлениях пространственно-временной функции в задачах сейсмической голографии. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1978. Вып. 83. С. 47—53.

Герасименко А. Н. Продолжение геометрических инвариантов в задачах сейсмической голографии: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Киев, 1979. 24 с.

Ганженко А. С., Герасименко А. Н. О системах формирования сейсмических изображений, использующих понятие двухточечного эйконала. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1979. Вып. 89. С. 40—47.

Герасименко А. Н. О формулах восстановления и отражения-преломления в геометрической сейсмике слоистых сред. *Геофиз. журн.* 1980. Т. 2. № 5. С. 65—74.

Герасименко А. Н. О некоторых тензорных соотношениях геометрической сейсмике. *Геофиз. журн.* 1981. Т. 3. № 1. С. 105—112.

Герасименко А. Н. Продолжение геометрических инвариантов в кинематических задачах сейсморазведки: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Киев, 1981. 24 с.

Герасименко А. Н. Задачи квадратичных аппроксимаций в геометрической сейсмике слоистых сред. *Геофиз. журн.* 1981. Т. 3. № 5. С. 17—26.

Герасименко А. Н. Лучевой метод в геометрической сейсмике сложнопостроенных слоистых сред. Киев: Наук. думка, 1982. 188 с.

To Editor-in-Chief of “Geophysical Journal”  
V. I. Starostenko

In the article N. V. Olali, D. B. Vengrovich, M. P. Malezhyk “Mathematical modeling of the elastic behavior of structured geophysical media” published in “Geophysical Journal” Vol. 39, No. 5, 2017, we have made a serious mistake. Considering for digital finite element solution the mathematical model of elastic behavior of structured geophysical media, which allows to obtain analytical dependence between elastic parameters and structure we have used solutions of G. A. Vanin, obtained from his monograph “Micromechanics of composite materials”, Kiev: Naukova dumka, 1985, while the corresponding binding reference to the source was omitted. Recognizing the non-acceptance of such a point the authors sincerely apologize for the error of omission. We apply for article retraction because of the unlawful borrowings in a significant amount and ask to consider this article as is not published.

N. V. Olali, M. P. Malezhyk, 25 October 2017

Главному редактору “Геофизического журнала”  
В. И. Старостенко

У статті N. V. Olali, D. B. Vengrovich, M. P. Malezhyk “Mathematical modelling of the elastic behavior of structured geophysical media”, розміщеній в “Геофизическом журнале” Т. 39, № 5, 2017 р., нами допущена серйозна помилка. Використавши відому математичну модель пружної поведінки композитного середовища та аналітичні залежності між пружними параметрами і структурою, перед результатами чисельного моделювання методом скінченних елементів для виявлення меж застосування аналітичних формул були приведені результати Г. А. Ваніна з його монографії “Микромеханика композиционных материалов”, Киев: Наукова думка, 1985. При цьому в поданому до друку рукописі було пропущене відповідне обов’язкове посилання на джерело. З огляду на неприпустимість цього, автори приносять свої щирі вибачення. Просимо відкликати дану статтю через вміст неправомірних запозичень в значному об’ємі та вважати її неопублікованою.

N. V. Olali, M. P. Malezhyk, 25 жовтня 2017 р.

Главному редактору “Геофизического журнала”  
В. И. Старостенко

В статье N. V. Olali, D. B. Vengrovich, M. P. Malezhyk “Mathematical modelling of the elastic behavior of structured geophysical media”, помещенной в “Геофизическом журнале” Т. 39, № 5, 2017 г., нами допущена серьезная ошибка. Использовав известную математическую модель упругого поведения композитного материала и аналитические зависимости между упругими параметрами и структурой, перед результатами численного моделирования методом конечных элементов для выявления границ применения аналитических формул были приведены результаты Г. А. Ванина из его монографии “Микромеханика композиционных материалов”, Киев: Наукова думка, 1985. При этом в поданной в печать рукописи была пропущена соответствующая обязательная ссылка на источник. Учитывая недопустимость этого, авторы приносят свои искренние извинения. Просим отозвать данную статью из-за наличия неправомерных заимствований в значительном объеме и считать ее неопубликованной.

N. V. Olali, M. P. Malezhyk, 25 октября 2017 г.

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  
<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 07.10.2015 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*

Технические консультанты *Д. Н. Гринь, Т. А. Амашукели*

Компьютерная верстка *Л. В. Мельниковой*

Компьютерная графика *Я. Ю. Дулицкой*

**Вниманию читателей!**

В ИНСТИТУТЕ ГЕОФИЗИКИ

ИМ. С. И. СУББОТИНА НАН УКРАИНЫ ИЗДАЕТСЯ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

созданный в 1979 г. на базе основанного в 1956 г. и публиковавшегося Институтом геофизики НАН Украины «Геофизического сборника». На страницах этого журнала освещаются новые данные теоретических и экспериментальных геофизических исследований, материалы о закономерностях распределения различных физических полей Земли, вопросы комплексного изучения глубинного строения литосферы, современной геодинамики и прогноза землетрясений, результаты исследований физических свойств минерального вещества в различных *PT*-условиях, работы в области геотермии, палеомагнетизма, геофизики Мирового океана, поисков и разведки полезных ископаемых геофизическими методами и др. Публикуются также методические и аппаратурные разработки, материалы дискуссий, рецензии, сообщения о научных совещаниях и другая информация.

- Рассчитан на широкий круг геофизиков и геологов: научных работников, преподавателей, инженеров, аспирантов, студентов, работников поисковых партий и экспедиций.
- Статьи публикуются на русском, украинском или английском языках.
- Периодичность — раз в два месяца.
- Индекс 74116.
- Только своевременно оформленная подписка или заказы в нашей редакции и ОНТИ Института геофизики НАН Украины могут гарантировать Вам получение журнала. Кроме того, возможно приобретение его отдельных номеров за прошлые годы. Подписку на «Геофизический журнал» для дальнего зарубежья можно оформить на сайте ДП «Пресса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua)

**Подписывайтесь и заказывайте  
«Геофизический журнал»!**