

Возможная природа сейсмической активности недр Преддобруджского прогиба и Северной Добруджи

© В. И. Старостенко, Т. К. Бурахович, А. Н. Кушнир, О. В. Легостаева,
Т. А. Цветкова, Е. М. Шеремет, Л. А. Шумлянская, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 1 марта 2012 г.

Представлено членом регколлегии В. Н. Шуманом

Переддобруджский прогин и суміжні структури належать до частини мантії під Східно-європейською платформою, визначеної змінами нульової ізолінії нев'язок швидкості з глибиною в межах верхньої мантії і її перехідної зони за даними 3D *P*-швидкісної моделі. Мантійній прилежній зоні відповідає система похилих шарів. Особливості швидкісної будови мантії під Переддобруджським прогином і суміжними структурами дають змогу виділити мантійні передумови сейсмічності цієї області, пов'язані з проявом мантійного плюму в нижній і середній мантії. Тривимірна глибинна геоелектрична модель, яка побудована за результатами сучасних досліджень методами МТЗ і МВП, відбиває неоднорідний розподіл питомого електричного опору в надрах регіону. Витягнуті на сотні кілометрів провідники приурочені до глибинних провідних розломів різного рангу і їх перетинів. У межах південного борту Переддобруджського прогину виділено високопровідний шар складної конфігурації, який залягає на глибинах, що відповідають нижній корі і верхам верхньої мантії. Вогнища землетрусів, як і аномалії високої електропровідності, переважно відповідають розміщенню активних глибинних тектонічних розломів і зон зчленування різновікових геологічних структур. У інтервалі 28—30° сх. д. — 45—46° півн. ш. просторове розміщення аномалій електропровідності співвідноситься із зоною прояву глибинних мантійних флюїдів, що відповідають мантійному плюму.

PeriDobruzha depression and its surrounding belong to border zone of the mantle under the EEP, distinguished by the changes of zero isoline of velocity discrepancies with the depth within the limits of the upper mantle and its transition zone according to the data of 3D *P*-velocity model. The system of inclined layers corresponds to mantle border zone. Special features of mantle velocity structure under PeriDobruzha depression and its surrounding made possible to partition mantle prerequisites of seismicity of the area under consideration related to manifestation of mantle plume in the lower and medium mantle. Three-dimensional deep geo-electric model constructed according to the results of modern studies by MTS and MVP methods reflects heterogeneous distribution of present electric resistance in the depth of the region. Extended for hundreds of kilometers conductors are confined to deep conducting faults of different rank and their intersections. High-conductivity layer of complicated configuration is distinguished at the southern flank of the PeriDobruzha depression and occurs at the depths corresponding to lower crust and upper parts of the upper mantle. The source of the earthquakes as well as the anomalies of high electro-conductivity are mainly corresponding to occurrence of active deep tectonic faults and connection zones of geological structures of different ages. Within the interval of 28—30° eastern longitude — 45—46° northern latitude spatial disposition of electric conductivity anomalies comply with the area of manifestation of deep mantle fluids corresponding to mantle plume.

Введение. Одним из ярких проявлений геодинамических процессов Земли является сейсмичность. Работы последнего десятилетия по проблемам сейсмичности все чаще связываются с вопросами дегазации Земли и, как следст-

вие, с проявлением сверхглубинных и глубинных флюидных процессов в коре и мантии Земли. Область исследований, представленная в данной статье, как и вся северная ветвь Евразийского пояса, сопровождается аномалиями

электропроводности в земной коре и верхней мантии [Кулик, 2009].

Проблемы дегазации Земли и флюидопроводящих зон тесно связаны с понятием плюма. Согласно работе [Добрецов и др., 2001], эволюция активных зон Земли, включая коллизионно-складчатые пояса, может быть представлена как проявление двух независимых последовательностей процессов. Первая серия включает в себя стадии развития складчатого пояса и одновременно последовательность взаимодействия литосферы с астеносферными течениями, а также взаимодействие плит. Стадии, входящие в эту серию, обусловлены конвективными течениями в астеносфере и утяжелением (эклогитизацией) субдуктирующей плиты. Все главные параметры (мощность литосферы и астеносферы, интенсивность и характер магнетизма и метаморфизма, тектоническая активность и рудообразование) закономерно изменяются при переходе от начальной стадии к поздней. Вторая серия формируется под воздействием мантийных плюмов на литосферу. Первичные плюмы поднимаются от границы ядро—мантия и имеют комбинированную, термохимическую природу. Вторичные плюмы формируются под воздействием первичных плюмов на границе верхней и нижней мантии. Вторая серия не зависит от первой и может накладываться на любую стадию первой серии. Чаще всего стадии второй серии проявляются в начальную океаническую стадию и коллизионную либо постколлизионную стадию на континентах.

В тектоническом отношении область проведенных исследований принадлежит западной части Причерноморского прогиба [Чекунов и др., 1976], который приурочен к зоне сочленения древней Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и молодой Скифской плиты. В его пределах выделяются три основные зоны: Северный борт, расположенный на древнем докембрийском фундаменте, Южный борт — на молодом складчато-метаморфизованном герцинско-кимерийском фундаменте Скифской плиты и осевая часть грабенов в зоне сочленения разновозрастных платформ. Докембрийский фундамент ВЕП в осевой части Причерноморской впадины сочленяется с Причерноморским шовным грабеном, представляющим собой глубокую депрессию субширотного простирания. Формирование шовной зоны началось в триасе — юре. Она выполнена толщей мезо-кайнозойских отложений мощностью до 8000 м. Шовная зона включает в себя Преддобруджский палеозой-

ский (Молдавский грабен) и Северо-Крымский прогибы. Хорошо известно, что тектонические границы и границы фундамента ВЕП не совпадают между собой [Хаин, 2001].

Одна из составных частей запада осевой зоны — Преддобруджский прогиб — это сложно построенная грабенообразная структура, выполненная платформенными палеозойскими и триасово-юрскими отложениями. Он сочленяется со складчатыми сооружениями Добруджи по серии крупных разломов северо-западного простирания.

Цель данной статьи — найти соответствие характеристик сейсмических процессов мантии с изменением геоэлектрических параметров коровых проводников, оцененных по данным магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и магнитовариационного профилирования (МВП).

Геофизическими исследованиями последних десятилетий было установлено широкое распространение в консолидированной земной коре континентов сейсмических и геоэлектрических неоднородностей. Один из обзоров результатов глубинных геоэлектрических исследований Евразийского региона [Кулик, 2009] дает возможность предположить существование пояса проводящих структур в земной коре, который коррелирует с северной ветвью Альпийско-Гималайского подвижного пояса [Хаин, 2001]. Этот пояс расчленяется на несколько ветвей. Одна из них — Добруджинско-Крымско-Кавказская — протягивается от Северной Добруджи, продолжается в Крыму, на Большом Кавказе и через Апшеронский порог прослеживается от Копетдага до Урала. В образовании проводящих структур земной коры одна из основных ролей принадлежит флюидам, ответственным за образование электропроводящих слоев. В свою очередь очаги коровых землетрясений в большинстве случаев концентрируются над верхней кромкой верхних частей волновода или электропроводящих слоев [Киссин, Рузайкин, 1997].

Сейсмические представления флюидных процессов ассоциируются с расслоенностью скоростной среды. Следы прохождения глубинных и сверхглубинных флюидов, по Ф. А. Летникову [Летников 1999; 2003], определяются процессами плотностной дифференциации и характеризуются послойной инверсией высоких и низких скоростей. Следы прохождения мантийных плюмов по данным сейсмотомографии характеризуются низкоскоростной областью, распространяющейся от нижней мантии к верхней и далее к коре [Добрецов и др., 2004].

Скоростное строение мантии под Добруджей. В работе использовалась полученная методом Тейлорового приближения 3D P -скоростная модель мантии под Евразией. Результаты представлены в виде горизонтальных, широтных и долготных сечений. Горизонтальные сечения — в "истинных" скоростях, долготные и широтные сечения — в виде невязок "истинных" скоростей относительно модели обобщенной средней скорости для мантии под территорией Евразии и ее окружением:

$$\delta = V_{\text{ист}} - V_{\text{aver}}$$

При условии $\delta < 0$ изолинии невязок определяют пониженные относительно обобщенной средней скорости, при условии $\delta > 0$ — повышенные. Модель обобщенной средней скорости выполняет роль референтной модели при графическом представлении результатов (более детально см. работу [Гейко, 2004]).

Границам между верхней мантией и слоем Голицына — Гейко (скоростной характеристике переходной зоны верхней мантии), а затем между ним и зоной раздела 1 соответствует нулевая невязка. Учитывая отсутствие трехмерной P -скоростной модели коры и использование в качестве исходных данных времен первых вступлений P -волн, представленных в бюллетенях ISC, скоростные характеристики коры введены согласно модели Джеффриса — Буллена. Все рассмотрения скоростного строения мантии проводятся в соответствии с химико-минералогической моделью мантии Земли, предложенной в работах [Пушаровский, 1998; Пушаровский Ю. М., Пушаровский Д. Ю., 2010].

Рассматриваемая область ограничена координатами $28\text{--}30^\circ$ в. д. \times $45\text{--}46^\circ$ с. ш., что соответствует Преддобруджскому прогибу и Северной Добрудже, и относится к мантийной пограничной области под ВЕП [Цветкова, Бугаенко, 2012]. Пограничная область определена как область, ограниченная распространением нулевой изолинии невязок скорости с глубиной в пределах верхней мантии и слоя Голицына — Гейко. Согласно работе [Цветкова, Бугаенко, 2012], мантийной пограничной зоне соответствует система наклонных слоев. В пределах верхней мантии и слоя Голицына — Гейко рассматриваемой области выделяются следующие наклонные слои. В сечении 46° с. ш. (рис. 1) первый высокоскоростной наклонный слой наблюдается от высокоскоростной верхней мантии под Причерноморской впадиной до высокоскоростного слоя Голицына — Гей-

ко под Карпатами. Окончание наклонного слоя соответствует глубине 425 км. Второй высокоскоростной наклонный слой распространяется в верхней мантии и слое Голицына — Гейко от Туранской плиты до мантии под Северной Добруджей. В сечении 45° с. ш. отмечается сложное распространение высокоскоростного наклонного слоя. Последний наблюдается на фоне низких скоростей окружения от мантии под Скифской плитой до мантии под Северной Добруджей, достигая глубины 200 км с последующим выступом на восток на глубине 200—300 км, и далее погружается на запад до глубины 425 км и более. В этом же сечении отмечается второй высокоскоростной наклонный слой, распространяющийся в верхней мантии и слое Голицына — Гейко, от мантии под Туранской плитой до мантии под Северной Добруджей, что повторяет второй высокоскоростной наклонный слой предыдущего сечения. Первый высокоскоростной наклонный слой широтного сечения 46° с. ш. (см. рис. 1) сохраняет приведенную конфигурацию высокоскоростного наклонного слоя предыдущего сечения (45° с. ш.) в пределах Скифской плиты и Северной Добруджи. При этом первый высокоскоростной наклонный слой (45° с. ш.) выделяется на низкоскоростном фоне окружения верхней мантии. Для широтного сечения 46° с. ш. первый наклонный слой выделяется на высокоскоростном фоне, характеризующем верхнюю мантию под Скифской плитой и ВЕП, что свидетельствует о переходе от стабильной к активизированной мантии согласно модели Пушаровских. Область окончания наклонных слоев широтных сечений соответствует мантии под исследуемой областью и, далее, мантии под Карпатами. Долготные сечения, относящиеся к исследуемой области (рис. 2), показывают выделение наклонных высокоскоростных слоев, начинающихся от верхней мантии под склоном Украинского щита (УЩ) и наблюдаемых до переходной зоны мантии под Мизийской плитой (28° в. д.) и Черным морем ($29\text{--}30^\circ$ в. д.) на глубине 425 км.

Область $45\text{--}46^\circ$ с. ш. позволяет более четко представить геодинамическую ситуацию. В сечении 45° с. ш. на глубинах нижней мантии ($22\text{--}30^\circ$ в. д.) выделяется низкоскоростная область, распространяющаяся вверх, ограниченная нулевой изолинией невязки скоростей (см. рис. 1). Область проходит через высокоскоростную зону раздела 2 и далее вверх по средней мантии, где разделяется на две ветки, одна из которых имеет восточное направление

и доходит до 1300 км в мантии под Альминской впадиной. Максимальному поднятию (800 км для 28° в. д.) указанной низкоскоростной области в широтных сечениях 45—46° с. ш. соответствует поднятие зоны раздела 1 и переходной зоны верхней мантии под исследуемой областью. Здесь отмечается утонение низкоскоростной переходной зоны, а именно: глубина залегания подошвы изменяется от 700 до 550 км, кровли переходной зоны — от 550 до 500 км, в то время как восточнее глубина залегания подошвы определена на глубине 700 км и западнее 24° в. д. отсутствует полностью. В верхней мантии (45° с. ш.) области поднятия соответствует субвертикальная скоростная колонка, представленная двумя чередующимися скоростными аномалиями: на глубине 450—500 км — низкоскоростной и на глубине 400—300 км — высокоскоростной. Особенностью скоростного строения средней мантии в интервале 45—46° с. ш. является высокоскоростной наклонный слой, распространяющийся на восток в мантии под Черным морем, начало которого приурочено к максимальному поднятию кровли средней мантии (см. рис. 1).

Распространение вверх через нижнюю и среднюю мантию низкоскоростной области, максимуму поднятия которой соответствует формирование высокоскоростных наклонных слоев, присутствие субвертикальной скоростной колонки в верхней мантии над указанной областью, повышенный тепловой поток [Гордиенко и др., 2004] и положительные мантийные аномалии гравитационного поля [Кабан, 2001; Богатиков и др., 2010] позволяют предположить, что выделенная низкоскоростная область является проявлением мантийного плюма по скоростным характеристикам в сечении 45° с. ш.

Широтное сечение 46° с. ш. показывает, что в данной области, в основном соответствующей северной части Преддобруджского прогиба, картина меняется. Для данного сечения наблюдается затухание выделенного в предыдущем сечении проявления мантийного плюма. Основным отличием от предыдущего сечения является отсутствие распространяющейся вверх низкоскоростной области через среднюю и нижнюю мантию. Отсутствует выход низких скоростей из нижней мантии в зону раздела 2. В целом данному участку мантии соответствует высокоскоростная верхняя мантия, низкоскоростной слой Голицына — Гейко, высокоскоростная зона раздела 1, распространяющаяся как наклонный слой в мантию под Черным морем, низкоскоростная средняя мантия,

высокоскоростной слой зоны раздела 2 и низкоскоростная нижняя мантия. На кровле нижней мантии (28—29° в. д.) сохраняется ее поднятие. В зоне раздела 2 над указанным поднятием формируется выступ кровли в восточном направлении. На фоне высокоскоростного наклонного слоя, распространяющегося под Преддобруджский прогиб от мантии под Причерноморской впадиной (27—29° в. д.), начало которого соответствует области максимального поднятия кровли нижней мантии низкоскоростной области, выделяются менее высокоскоростная аномалия на глубине 75—125 км (0,025 км/с) и более высокоскоростная на 300—400 км (0,075 км/с) (см. рис. 2). В верхней мантии выделяется мантийная субвертикальная колонка как след прохождения глубинного флюида. Последний может быть следствием мантийного плюма в нижней и средней мантии рассматриваемой территории.

Совокупность выявленных особенностей скоростных характеристик мантии под изучаемой областью выявляет следующие мантийные предпосылки сейсмической активности рассматриваемой области: проявление по скоростным характеристикам мантийного плюма в средней и нижней мантии; присутствие высокоскоростных наклонных слоев в верхней мантии, ее переходном слое и средней мантии; проявление субвертикальных мантийных колонок в верхней мантии как следов прохождения глубинного флюида.

Принятая в настоящий момент аксиоматика геофизической среды М. А. Садовского предполагает открытость, неравновесность, диссипативность, блоковую иерархичность среды. Из этого следует, что процессы, проходящие в геофизической среде, не могут находить отражение только в одном виде геофизического поля. Интерес представляет вопрос, какие особенности других геофизических полей соответствуют выделенным мантийным скоростным особенностям проявления плюмового процесса. Для рассматриваемой области известны повышенный тепловой поток [Гордиенко и др., 2004] и положительная аномалия мантийного гравитационного поля [Кабан, 2001]. Это позволяет, учитывая представленное на рис. 3 распределение очагов землетрясений по данным ISC за 1964—2009 гг., обсуждать возможную связь области проявления землетрясений с выделенными мантийными скоростными характеристиками плюмовых процессов. Определим особенности геоэлектрического строения региона и возможную связь с сейсмичностью.

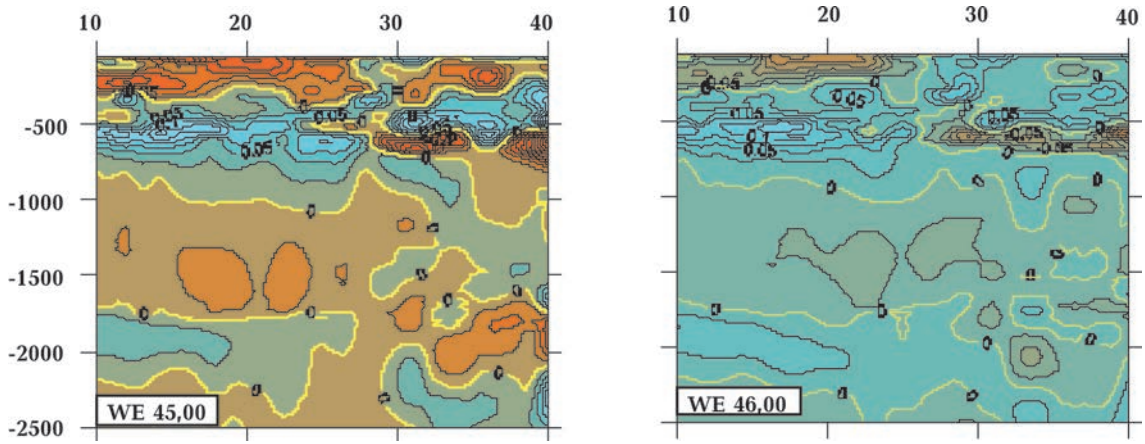


Рис. 1. Широтные сечения. Синие — высокие скорости, красные — низкие скорости, желтые — границы между ними.

Распределение электропроводности в недрах Северной Добруджи и Преддобруджского прогиба. Экспериментальными магнитовариационными исследованиями эта аномальная область в бухтообразных геомагнитных вариациях была впервые открыта авторами статьи [Рокитянский и др., 1979], а в дальнейшем подтверждена магнитотеллурическими работами в диапазоне 0,1—2000 с вдоль геотраверса Килия — Кривой Рог — Харьков [Ингеро и др., 1988]. По результатам анализа поперечных кривых МТЗ было высказано предположение

о существовании в районе Преддобруджского прогиба проводящего слоя в мантии на глубине 80 км с суммарной проводимостью 1500 См, вытянутого в меридиональном направлении, являющегося продолжением Карпатской коровой проводящей аномалии на юге. В работе [Рокитянский и др., 1977] также предполагалось существование так называемой Черноморской ветви Карпатской аномалии электропроводности. Результат двумерного моделирования по профилю Лаз — Бырлад [Кулик и др., 1995] показал, что проводящая структура Вулканическо-

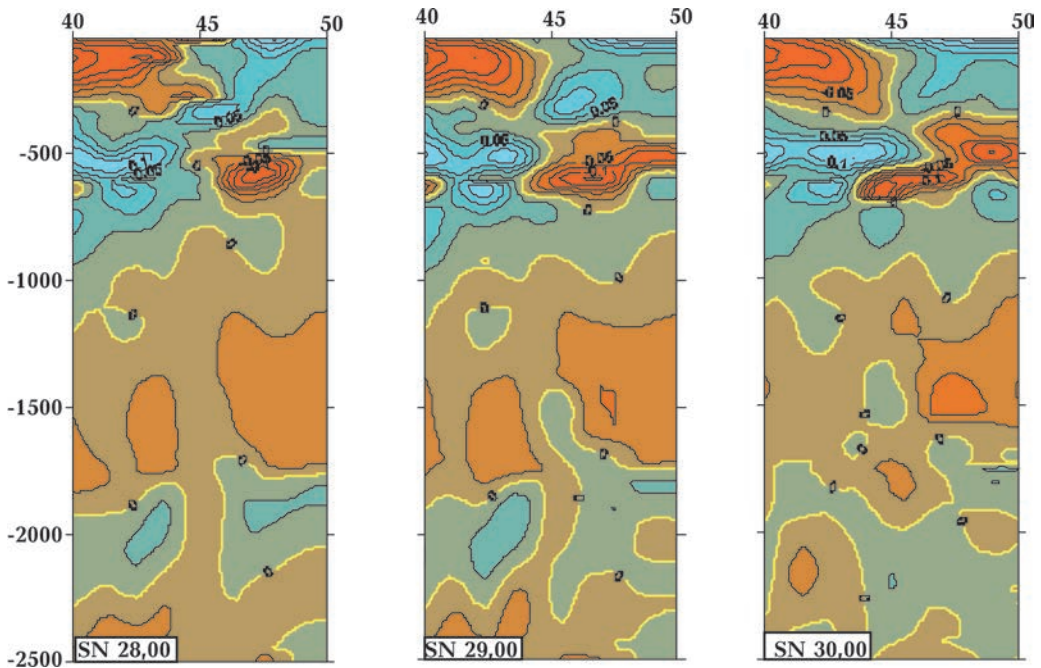


Рис. 2. Долготные сечения. Условные обозначения см. на рис. 1.

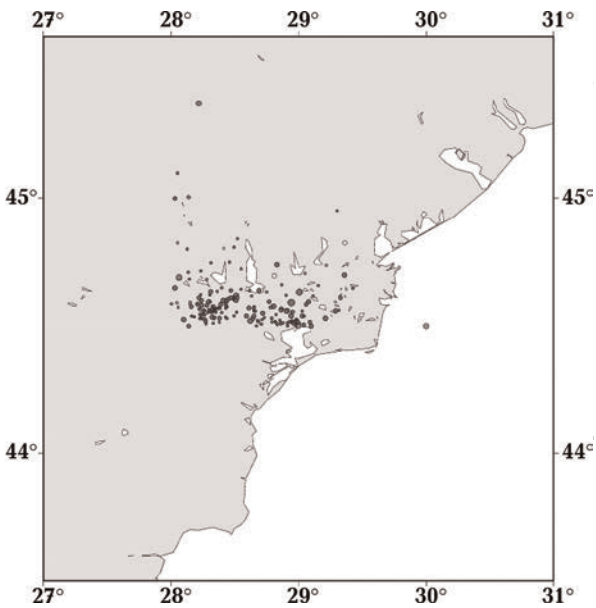


Рис. 3. Эпицентры землетрясений исследуемого района.

го хребта служит южным окончанием внутрикоровой Карпатской аномалии электропроводности, приуроченной к Выгорлат-Гутинской вулканической гряде. Этот вывод подтвержден экспериментальными магнитовариационными наблюдениями [Pinna et al., 1982].

Геоэлектрическое изучение Южных Карпат румынскими учеными показало, что под структурой Южных Карпат в земной коре существует обособленная вытянутая область высокой электропроводности [Stanica et al., 1999]. Дуга Карпат (с Карпатской аномалией электропроводности) отделяет всю систему от Северной Добруджи (с Преддобруджской аномалией электропроводности), в частности, Пеценега-Каменской зоной разломов.

В юго-западной части Украины в Преддобруджском прогибе были сделаны глубинные МТЗ и МВП в широком диапазоне периодов поля геомагнитных вариаций [Бурахович и др., 1995].

Анализ серии 2D моделей и их сравнение с наблюдаемыми значениями кажущегося удель-

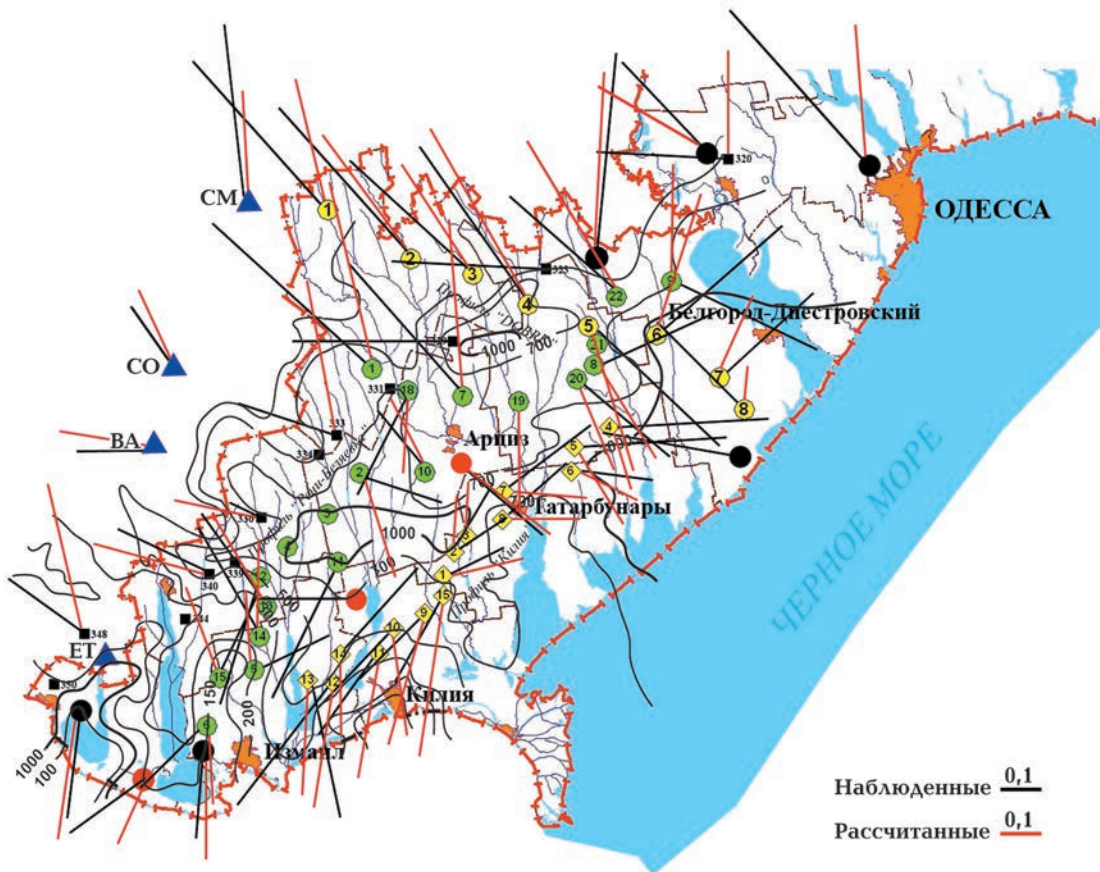


Рис 4. Обзорная карта района работ, изученная методами МТЗ и МВП, по данным [Ингеров и др., 1988; Рокитянский и др., 1979; Бурахович и др., 1995; 2011 а, б]. Наблюдаемые и рассчитанные для трехмерной модели индукционные параметры для периода геомагнитных вариаций 400 с.

ного электрического сопротивления и магнитовариационных индуцированных полей указывает на существование на юге (в отличие от севера) "астеносферы" — проводящего слоя в интервале 110—160 км с продольной суммарной электропроводностью (S) 700 См и двух объектов высокой электропроводности на глубине 10—20 км ($S = 200$ См) и на 40—80 км ($S = 1000$ См).

По данным МВП были построены квазитрехмерные пленочные модели Карпатского региона [Бурахович, 2004], где отдельным объектом с $S = 5000$ См на глубине 10 км представлена область сочленения Скифской, Мизийской плит и Добруджи.

Анализ модели распределения S в недрах Карпатского региона показал, что области аномально высокой электропроводности Западных Карпат приурочены к зоне сочленения Флишевых Карпат и Внутренних покровов, включая Пенинскую и Мармарошскую зоны. Аномалия Южных Карпат приурочена к зоне сочленения Внутренних покровов, разделяющих Паннонию от Трансильвании, и Южных Карпат, а не к Предкарпатскому прогибу. Аномалия западной части УЩ и его склона (Черновицко-Коростенская) возможно соединяется с Флишевой зоной Восточных Карпат и Мармарошским поясом. Западные ответвления этой аномалии совпадают с зоной сочленения юго-западной окраины ВЕП со Скифской плитой.

Можно предположить, что существует несколько основных аномальных тел высокой электропроводности, возможно не соединенных гальванически друг с другом: Карпатская аномалия электропроводности [Zhdanov 1986; Жданов и др., 1988], связанная с флишевыми Карпатами и Пенинским поясом, аномалия Предкарпатского прогиба Восточных Карпат, связанная с Черновицко-Коростенской, аномалия Южных Карпат и Добруджская аномалия электропроводности.

Построение 3D геоэлектрической модели.

Сегодня плотность наблюдений естественного электромагнитного поля внешнего источника в области низких частот позволяет построить трехмерную геоэлектрическую модель земной коры и верхней мантии и ответить на некоторые вопросы глубинного строения и геодинамики Северной Добруджи и Преддобруджского прогиба.

Построение основывалось на анализе параметров МВП и МТЗ в диапазоне периодов магнитотеллурического поля до 1000 с [Рокитянский и др., 1979; Ингеро́в и др., 1988; Бурахович и др., 1995; 2011 а, б] (рис. 4).

Инструментом для создания и расчета электрических и магнитных компонент магнитотеллурического поля, типперов и кривых кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_{κ}) послужила широко распространенная программа 3D моделирования [Maski et al., 1994].

Основные элементы методики трехмерного моделирования:

- априорно заданные значения удельного электрического сопротивления "нормального" ($\rho_{\text{н}}$) горизонтально-слоистого разреза земной коры и верхней мантии [Бурахович и др., 2011], на фоне которого строятся объемные геоэлектрические модели;
- неоднородное распределение электропроводности приповерхностного проводящего слоя. Его суммарная проводимость в основном соответствует мощности осадочных отложений и коррелирует с основными структурными геологическими единицами.

Северная Добруджа характеризуется относительно низкими значениями, но резкими изменениями суммарной продольной проводимости до 200 См (см. рис. 4). В Преддобруджском прогибе, где кристаллический фундамент залегает на глубине около 9 км, S не превышает 1000 См. На южном склоне УЩ значения S достигают 1000 См, в то время как на Молдавской плите — около 100 См. В акватории Черного моря S приповерхностного проводящего слоя принята в модели от 1000 до 2000 См.

Процесс моделирования — это сложная последовательная процедура расчета магнитотеллурических полей и сравнения результатов с наблюдаемыми экспериментальными данными.

Прежде всего были рассчитаны и проанализированы индукционные параметры для модели, которая состоит только из неоднородного поверхностного слоя на фоне "нормального" разреза. Анализ рассчитанных электромагнитных полей сделан для периодов вариаций от 400 до 1600 с [Бурахович и др., 2011 а, б].

Субширотно протяженные неоднородные проводящие структуры Преддобруджского прогиба значительно отразились на северной составляющей рассчитанного индукционного параметра $|C_y|$. Величина восточной составляющей $|C_x|$ получилась меньшей и к тому же ее распределение менее однородно. Рассчитанные индукционные параметры существенно отличаются от наблюдаемых, т. е. действительно можно предположить, что в консолидированной коре присутствуют аномалии высокой электропроводности.

Следующий шаг моделирования заключается в ведении в модель глубинных объектов вы-

сокой проводимости. Параметры этих структур и их пространственное расположение соответствуют результатам двумерного моделирования [Бурахович и др., 1995].

Расчеты модулей индукционных параметров для такой модели показывают, что в рамках трехмерных представлений они недостаточно удовлетворяют наблюдаемым данным [Бурахович и др., 2011 а, б].

Рассчитанные поля не отражают неоднократные изменения вдоль профилей наблюдений пространственных разворотов индукционных параметров (пункты 6 и 15, 13 и 2, 7 и 19, 22 и 9 профиля Рени — Беляевка, 15 и 1 профиля Килия, 4 и 5, 22 и 6 профиля Добре, в северной части рассчитанные величины в 1,5 раза меньше наблюдаемых. Следовательно, в геоэлектрическую модель необходимо внести

дополнительные приповерхностные вертикальные проводники (рис. 5), которые будут ориентированы в южной и центральной частях с северо-запада на юго-восток, а в северной — субмеридионально.

Качественный анализ кривых МТЗ предполагает существование аномалий высокой электропроводности на различных глубинах в разных зонах планшета. Так, на глубине от 10 до 40 км выделяются две небольшие по площади (в среднем 20×20 км) зоны: одна в южной части профиля Килия (пункты 11, 12, 13 и 14), вторая в северной части профиля Килия (пункты 4, 5) и на профиле Рени — Беляевка (пункты 8, 20, 21). На глубине от 40 до 60 км в южной части планшета (пункты 4—6, 12—15 профиля Рени — Беляевка и пункты 11—14 профиля Килия) возможно существование прово-

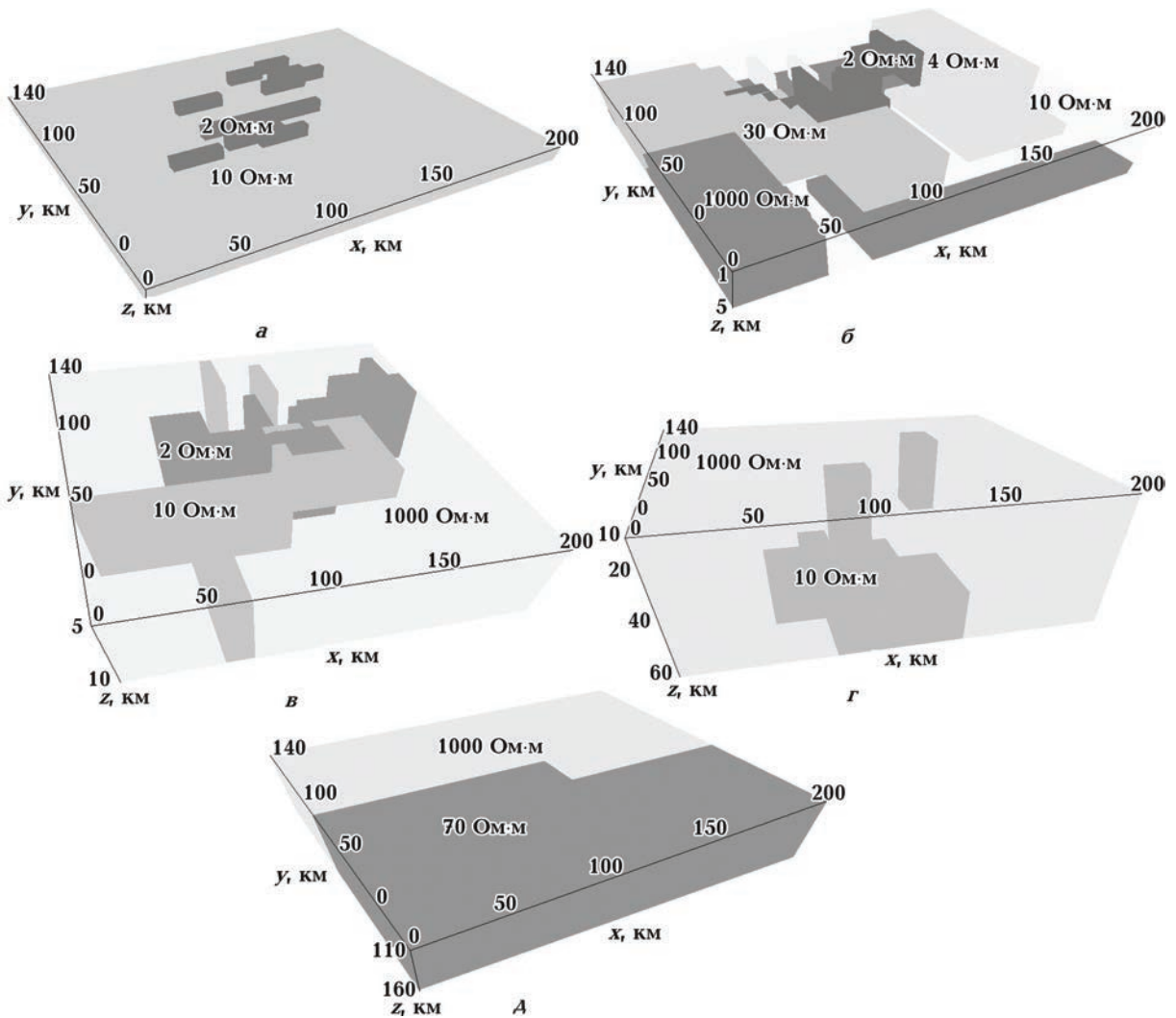


Рис. 5. Трехмерная геоэлектрическая модель Предобруджского прогиба и Добуджи в диапазоне глубин: а — от 0 до 1 км, б — от 1 до 5 км, в — от 5 до 10 км, г — от 10 до 60 км; д — от 110 до 160 км.

дящего слоя, простирающегося с северо-запада на юго-восток (рис. 5, г).

Южная часть аномальной области модели характеризуется неоднородной проводящей астеносферой на глубине от 110 до 160 км (рис. 5, д). Эти параметры соответствуют ранее выделенному под Скифской плитой проводящему слою в верхней мантии в интервале глубин от 110 до 140 км с суммарной продольной проводимостью 700 См, в отличие от ВЕП. В интервале глубин от 60 до 110 км удельное электрическое сопротивление соответствует "нормальному" и составляет 1000 Ом · м.

Было рассчитано огромное количество моделей с различными вариантами как пространственных параметров аномальных структур, так и значений удельного электрического сопротивления в земной коре и мантии (см., например, [Бурахович и др., 2011 а, б]). Окончательный вариант распределения удельного электрического сопротивления в недрах Преддобруджского прогиба и Добруджи представлен на рис. 5.

Сопоставление наблюдаемых и рассчитанных индукционных параметров приведено только для периода геомагнитных вариаций 400 с на рис. 4, а кривых МТЗ, расположенных в различных частях планшета — на рис. 6.

Трехмерная геоэлектрическая модель.

Вертикальные проводники с поверхности и до глубины 10 км образуют сеть гальванически связанных между собой, в основном вытянутых структур различной ориентации в пространстве (шириной от 5 до 15 км), которая соответствует разломным зонам (рис. 7, 5, б, в). Разворот в пространстве индукционных параметров, их значения свидетельствуют о том, что наиболее мощные приповерхностные аномалии электропроводности могут быть приурочены к Чадырлунгскому разлому, особенно в районах его пересечения с Фрунзенским, Саратовским разломами и местах резкой смены его направления. К таким же зонам можно отнести и ту часть Болградского разлома, которая заключена между Фрунзенским и Саратовским. Кроме того, проводящая зона (длиной более 100 км и шириной 10 км), изменяющая свое направление с субширотного на субмеридиональное, приурочена к району сочленения Кагульско-Измайловского краевого шва, разделяющего Прутский выступ и Преддобруджский прогиб, с Фрунзенским разломом. В самой верхней части геоэлектрического разреза (см. рис. 7, 5, а) на глубине до 1 км выделяется целая серия проводников субширотного простирания (шири-

ной от 5 до 10 км, длиной от 20 до 65 км). Наиболее вытянутые проводники сосредоточены в центральной части Преддобруджского прогиба.

В земной коре и верхах верхней мантии (от 10 до 60 км) основная проводящая структура сложной конфигурации (см. рис. 7, 5, г) территориально приурочена к блоку, который заключен между Фрунзенским и Кагульско-Измайловским (запад), Саратовским (восток) и Болградским (север) разломами на южном склоне Преддобруджского прогиба. Южная граница не определена. Можно предположить, что она состоит из двух соединенных между собой частей: верхней — вертикальной, с небольшими пространственными размерами, почти изометричной формы с диаметром до 20 км в интервале глубин от 10 до 40 км, и нижней — слоя с пространственными размерами от 15 до 65 км в субширотном и более 90 км в субмеридиональном направлениях в интервале глубин от 40 до 60 км.

Еще одна почти изометрическая область (15 × 25 км) высокой проводимости на глубине от 10 до 40 км выделяется на северном борту и приурочена к излому Чадырлунгского разлома (см. рис. 7, 5, г).

Северная граница проводящего слоя в верхней мантии на глубине от 110 до 160 км простирается субширотно и расположена территориально между Чадырлунгским и Болградским разломами (см. рис. 7, 5, д). По Саратовскому разлому происходит смещение на 30 км этой границы на юг, где она, возможно, продолжает субширотное простирание в акватории Черного моря.

Таким образом, территория Северной Добруджи и Преддобруджского прогиба, как и вся юго-западная окраина ВЕП, изобилует аномальными объектами высокой электропроводности в земной коре, а распределение электропроводности в верхней мантии отражает положение зоны сочленения древней ВЕП и молодой Скифской плиты. Пространственное расположение аномалий электропроводности соответствует проявлению субвертикальных мантийных колонок в интервале 28—30° в. д. × 45—46° с. ш.

Проявление сейсмичности на территории Северной Добруджи и Преддобруджского прогиба. По мнению многих сейсмологов [Друмя и др., 1964; Кутас и др., 2005; Пустовитенко и др., 2006] территория Северной Добруджи и Преддобруджского прогиба в сейсмическом отношении изучена слабо. За исторические времена здесь известно несколько зем-

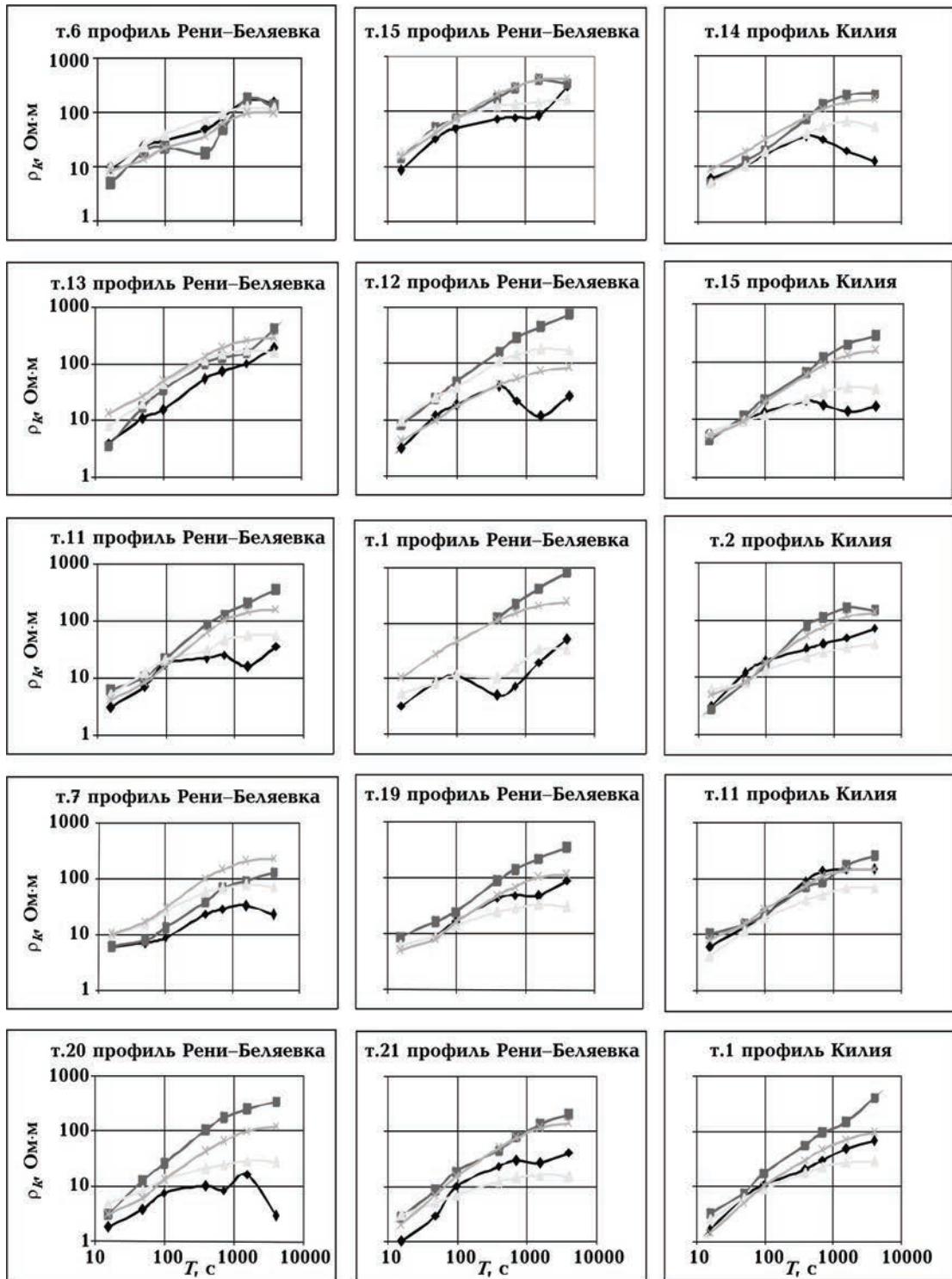
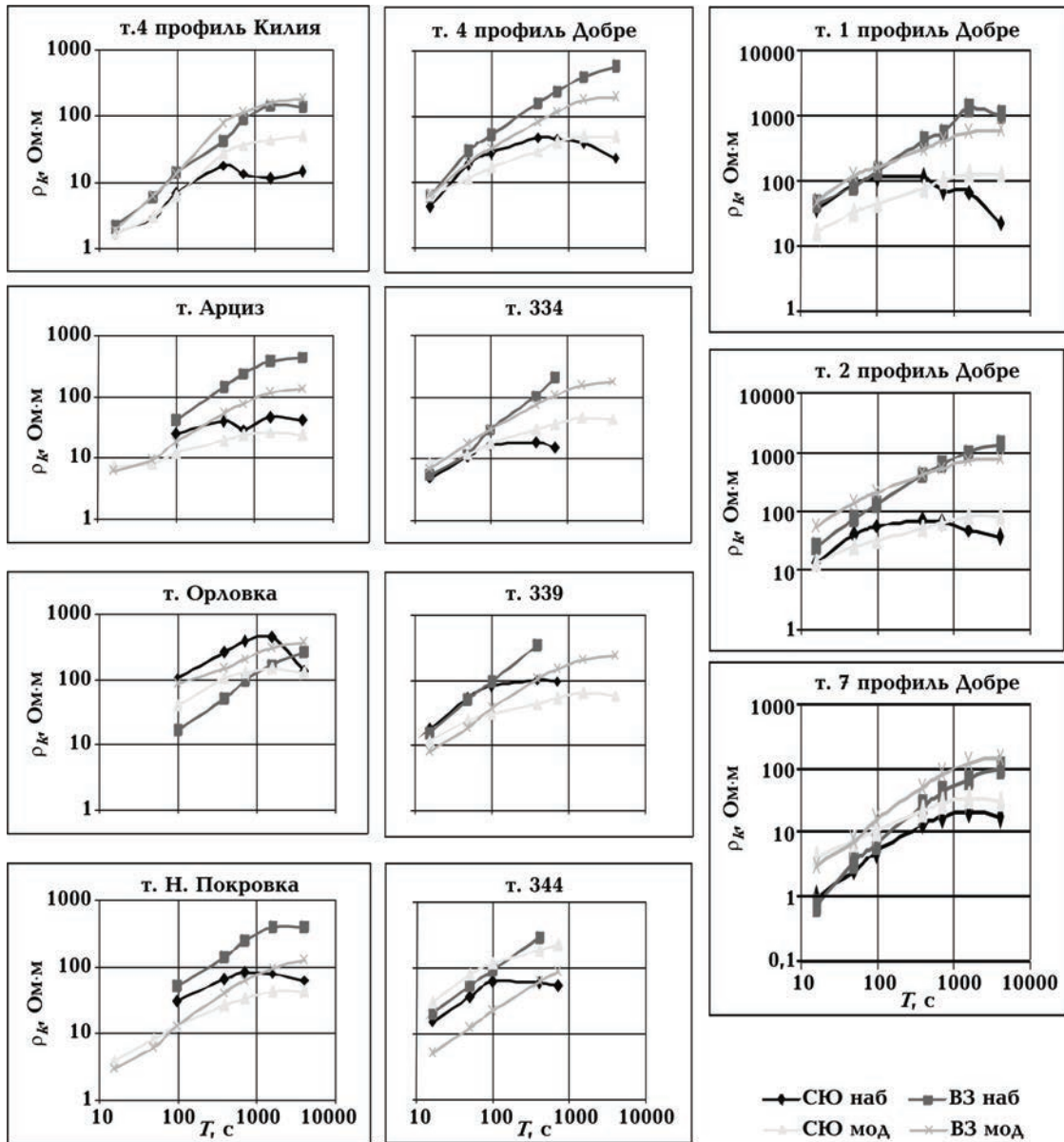


Рис. 6. Сопоставление наблюдаемых и рассчитанных кривых МТЗ для геоэлектрической модели, представленной на рис. 5.

летрясений с магнитудой $M = 3,5 \div 7,0$ с интенсивностью в эпицентре ≥ 5 баллов [Никонов, Никонова, 1990]. По разным источникам интенсивность сотрясений достигает 6 [Пусто-

витенко и др., 2006] и 7—8 баллов [Кутас и др., 2005]. Очаги землетрясений расположены на глубине от 0 до 35 км и глубже. По данным [Кутас и др., 2005], в качестве наиболее



Окончание рис. 6.

сейсмоопасных следует рассматривать районы (см. рис. 7) пересечения краевых швов, которые ограничивают Преддобруджский прогиб с севера (Чадырлунгский) и юга (Кагул-Измаильский), с субмеридиональными региональными мантийными разломами — Фрунзенским и Саратовским. Кроме того, сейсмоактивной является и зона Чадырлунгского краевого шва (Арцизская часть), раздробленная нарушениями разломов более низкого ранга — Алибейским и Черноморским.

Эпицентры землетрясений Северной Добруджи (Тулча, Измаил, Рени, Килия) сосредоточены на границе неглубокозалегающей (1—10 км) аномалии высокой электропроводнос-

ти ($\rho = 10$ Ом·м), которая территориально совпадает с местоположением Фрунзенского разлома и его пересечением с Кагул-Измаильским краевым швом. Очаги этих сейсмических событий залегают выше полномасштабной аномалии высокой электропроводности на глубине от 40 до 60 км, $\rho = 10$ Ом·м (см. рис. 7).

Эпицентры землетрясений на северном склоне Преддобруджского прогиба также совпадают с расположением аномалии высокой электропроводности сложной конфигурации в интервале глубин от 1 и до 40 км, $\rho = 2 \div 10$ Ом·м (см. рис. 7).

Таким образом, землетрясения происходят по обе стороны от границы аномального рас-

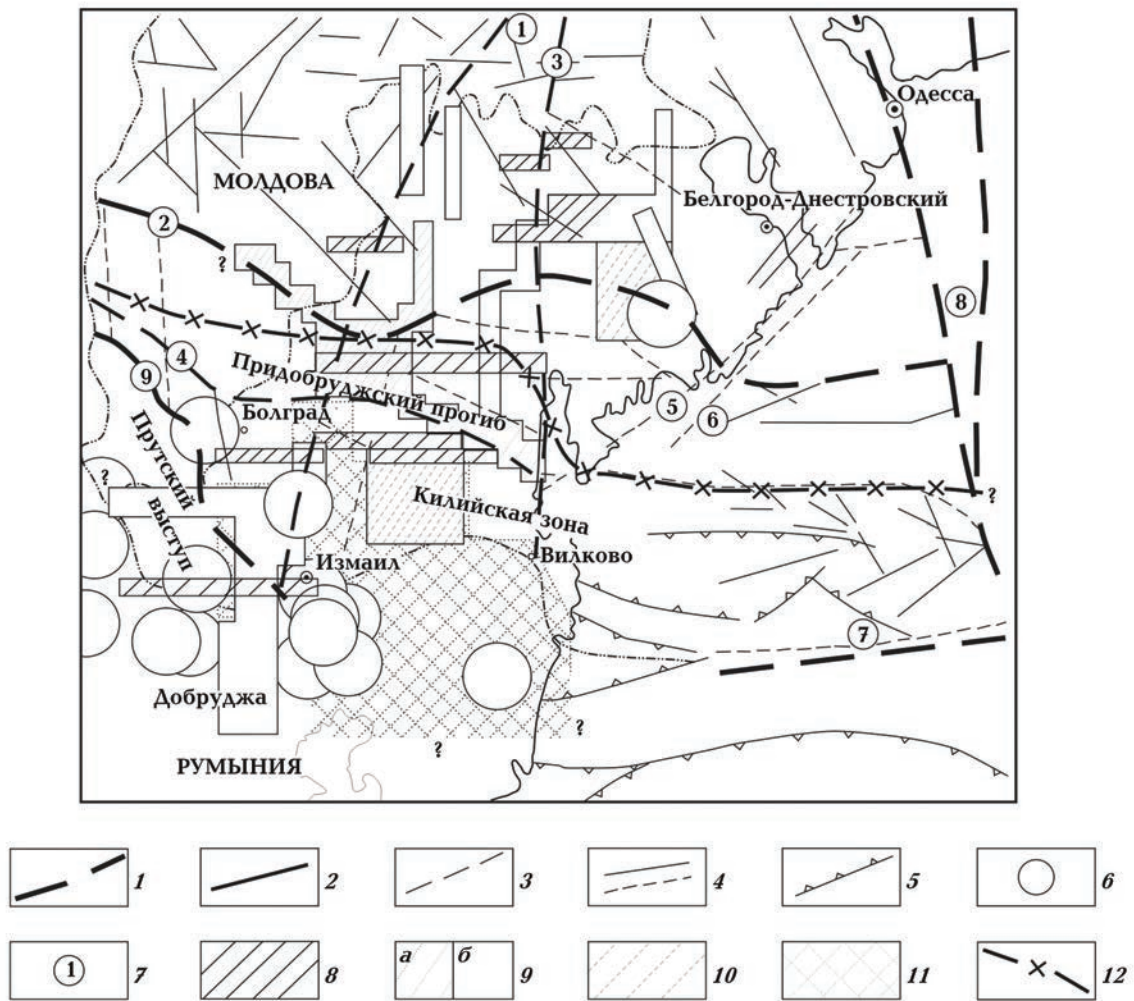


Рис. 7. Пространственное расположение аномалии высокой электропроводности Преддобруджского прогиба и Добруджи: 1—5 — глубинные разломные зоны разного ранга; 6 — эпицентры землетрясений по данным [Кутас и др., 2005]; 7 — номера разломов (1 — Фрунзенский, 2 — Чадырлунгский, 3 — Саратовский, 4 — Болградский, 5 — Алибейский, 6 — Черноморский, 7 — Сулинский, 8 — Одесский, 9 — Кагульско-Измайловский); *геоэлектрические параметры аномалий электропроводности*: 8 — глубина залегания кровли и подошва (h) от поверхности до 1 км, $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; 9 — $h = 1 \div 10 \text{ км}$ ($a - \rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $b - 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$); 10 — $h = 10 \div 40 \text{ км}$, $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; 11 — $h = 40 \div 60 \text{ км}$, $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; 12 — северная граница слоя $h = 110 \div 160 \text{ км}$, $\rho = 70 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

пределения в верхней мантии сочленения древней ВЕП и молодой Скифской плиты. Однако большинство отмечается именно в районе сосредоточения аномалий электропроводности на разных глубинах: от 1 до 10 км, от 40 до 60 км и от 110 до 160 км.

Выводы. Трехмерная глубинная геоэлектрическая модель, построенная по результатам современных исследований методами МТЗ и МВП, отражает неоднородное распределение удельного электрического сопротивления в недрах региона. Выделены аномалии высокой электропроводности от поверхности земной коры и до верхней мантии. Вытянутые на сотни ки-

лометров проводники приурочены к глубинным проводящим разломам различного ранга (Фрунзенскому, Саратовскому, Болградскому, Кагульско-Измайловскому, Чадырлунгскому и др.) и их пересечениям. Высокопроводящий слой выделяется на Южном борту Преддобруджского прогиба и залегает на глубинах, соответствующих нижней коре и верхам верхней мантии. Северный борт Преддобруджского прогиба характеризуется таким же распределением электропроводности в верхней мантии, как и ВЕП, в то время как Южный склон отличается проводящей структурой на глубине от 110 до 160 км.

Вне всякого сомнения, существует взаимо-

связь между проявлением сейсмичности и геоэлектрическими параметрами, которые отражают современное состояние земных недр. Происхождение аномалий высокой электропроводности может быть результатом геодинамических процессов на границах областей с различными их проявлениями.

Очаги землетрясений, как и аномалии высокой электропроводности, в основном коррелируют с активными глубинными тектоническими разломами и зонами сочленения геологических структур, какими и являются разновозрастные докембрийская ВЕП и киммерийская Скифская плита, на территории Преддобруджского прогиба и Северной Добруджи.

Учитывая повышенный тепловой поток, аномалии электропроводности в верхней мантии

и на различных глубинах коры, положительную аномалию мантийного гравитационного поля в этой области, поднятие кровли нижней мантии, присутствие низкоскоростной мантийной области, распространяющейся вверх от нижней мантии через зону раздела 2, среднюю мантию до переходной зоны верхней мантии, проявление в верхней мантии субвертикальной мантийной колонки как следа прохождения глубинного флюида можно объяснить сейсмическую активность указанной области проявлением мантийного плюма, связанных с ним флюидов и наклонных слоев.

Результаты геоэлектрических и сейсмических исследований взаимно дополняют друг друга.

Работа выполнена при поддержке гранта УНТЦ 5501.

Список литературы

- Богатилов О. А., Коваленко В. И., Шарков В. Е. Магматизм, тектоника и геодинамика Земли. — Москва: Наука, 2010. — 605 с.
- Бурахович Т. К. Квазитрехмерная геоэлектрическая модель Карпатского региона // Геофиз. журн. — 2004. — 26, № 4. — С. 63—74.
- Бурахович Т. К., Кулик С. Н., Кушниц А. Н., Заичев Г. Н., Шеремет Е. М., Николаев Ю. И., Николаев И. Ю. Трехмерная геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии Добруджи и Преддобруджского прогиба // Матер. Пятой Всерос. школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (ЭМЗ-2011). — Санкт-Петербург, 2011. — С. 184—187.
- Бурахович Т. К., Кулик С. Н., Кушниц А. Н., Заичев Г. Н., Ганиев А. З., Шеремет Е. М., Николаев Ю. И., Николаев И. Ю. 3D геоэлектрическая модель Добруджи и Преддобруджского прогиба: Збірник наук. праць УкрНДМІ НАНУ. — Донецьк, 2011. — 532 с.
- Бурахович Т. К., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии Преддобруджского прогиба и Северной Добруджи // Геофиз. журн. — 1995. — 17, № 4. — С. 81—87.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Логвинов И. Н., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Геотермический атлас Украины. — Киев: Корвін пресс, 2004. — 59 с.
- Добрецов Н. А., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. — 405 с.
- Друмя А. В., Устинова Т. И., Щукин Ю. К. Проблемы тектоники и сейсмологии Молдавии. Вып. 2. — Кишинев: Катря Молдовеняскэ, 1964. — 119 с.
- Жганов М. С., Бердичевский М. Н., Абрамова Л. М., Билинский А. И., Бобров В. Н., Варенцов И. М., Голубев Н. Г., Гордиенко В. В., Жганова О. Н., Кулик С. Н., Файнберг Э. Б., Шнеер В. С. Геоэлектрическая модель литосферы для района Карпат // Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы I, II, V. — Киев: Наук. думка, 1988. — С. 84—87.
- Ингеров А. И., Бутримов Л. П., Колдунов А. А., Попов В. М., Рокитянский И. И., Дзюба К. И., Лысенко Е. С., Рокитянская Д. А. Результаты МТЗ на участке Килия — Кривой Рог — Харьков // Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV. VI. VII. — Киев: Наук. думка, 1988. — С. 145—150.
- Кабан М. К. Гравитационная модель коры и верхней мантии Северной Евразии // Российский журнал наук о Земле. — 2001. — 3, № 2. — С. 143—163.
- Киссин И. Г., Рузайкин А. И. Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими слоями в земной коре Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли. — 1997. — № 1. — С. 12—29.
- Кулик С. Н. Северная ветвь Евразийских аномалий электропроводности // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 4. — С. 168—180.

- Кулик С. Н., Ланкис Л. К., Лысенко Е. С. Результаты численного моделирования глубинного геоэлектрического разреза региона Восточных Карпат и прилегающих территорий // Геофиз. журн. — 1995. — **17**, № 4. — С. 81—87.
- Кутас В. В., Омельченко В. Д., Остроухова О. А. Эпицентры землетрясений на юго-западе Украины // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 6. — С. 962—969.
- Летников Ф. А. Сверхглубинные флюидные системы Земли // Докл. РАН. — 2003. — **390**, № 5. — С. 673—675.
- Летников Ф. А. Флюидные фации континентальной литосферы и проблемы рудообразования // Смирновский сборник. — Москва: Б. и., 1999. — С. 63—98.
- Никонов А. А., Никонова К. И. О сейсмической опасности дельты р. Дуная по данным об исторических землетрясениях // Вопросы инженерной сейсмологии. — 1990. — Вып. 31. — С. 127—134.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Пустовитенко А. А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 3. — С. 54—77.
- Пуцаровский Ю. М. Сейсмотомография, тектоника и глубинная геодинамика // Докл. РАН. — 1998. — **360**, № 4. — С. 518—522.
- Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю. Геология мантии Земли. — Москва: Геос, 2010. — 138 с.
- Рокитянский И. И., Логвинов И. М., Рокитянская Д. А. Черноморская ветвь Карпатской аномалии электропроводности // Геофиз. сб. — 1979. — Вып. 87. — С. 65—67.
- Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. — Москва: Научный мир, 2001. — 586 с.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В. Сейсмотомография мантии под Восточно-Европейской платформой: мантийные скоростные границы // Геофиз. журн. — 2012. — **34**, № 5. — С. 161—172.
- Чекунов А. В., Веселов А. А., Гилькман А. И. Геологическое строение и история развития Причерноморского прогиба. — Киев: Наук. думка, 1976. — 156 с.
- Gejko V. S. A general theory of the seismic travel-time tomography // Геофиз. журн. — 2004. — **26**, № 2. — С. 3—32.
- Macki R. L., Smith J. T., Madden Th. R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example // Radio Sci. — 1994. — **29**, № 4. — P. 923—935.
- Pinna E., Soare A., Stănică D., Stănică M. Carpathian conductivity anomaly and its relation to deep structure of the substratum // Acta. Geod., Geoph. Et Mont. Hung. — 1982. — **27**, № 1. — P. 35—45.
- Stănică M., Stănică D., Marin-Furnica C. The placement of the Trans-European Suture Zone on the Romanian territory by electromagnetic arguments // Earth Planet. Space. — 1999. — **51**. — P. 1073—1078.
- Zhdanov M. S., Golubev N. G., Varentsov I. M., Abramova L. M., Shneer V. S., Berdichevsky M. N., Zhdanova O. N., Gordienko V. V., Bilinsky A. I., Kulik S. N. 2D model fitting of a geomagnetic anomaly in the Soviet Carpathians // Annal. Geophys. — 1986. — **4B**, № 3. — P. 335—342.