ISSN 2078-502X 💿 🛈



2025 VOLUME 16 ISSUE 2 ARTICLE 0815

DOI: 10.5800/GT-2025-16-2-0815

CONDUCTIVE ZONES IN THE LITHOSPHERE OF THE FOLD BELT OF EURASIA AND THEIR RELATIONSHIP TO MODERN GEODYNAMIC PROCESSES

V.V. Belyavsky 💿, Iv.M. Varentsov 💿, I.N. Lozovsky 💿 🖂

Geoelectromagnetic Research Center, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

ABSTRACT. Here is a general review of long-term magnetotelluric (MT) studies of the lithosphere of the Fold Belt of Eurasia (North Caucasus, Altai-Sayan, Koryak-Kamchatka, and Tien Shan regions). The results have contributed to the development of the geological and geophysical database for seismic zoning, identification of active tectonic structures, and exploration of mineral resources. In the course of integrated interpretation of the MT data, regional geoelectric models have been constructed, conductive anomalies have been related to low-velocity and high-absorption zones, deep-seated conductive faults and rheologically weak zones have been identified, and their relationship to the location of earthquake hypocenters and miscellaneous volcanic features has been studied. The research involved 1D, 2D, and 3D MT data inversions. The inversions were preceded by the analysis of the invariants of the impedance tensor. The initial models for solving 3D inverse problems by trial-and-error method or method of formalized inversion of all components (or invariant parameters) of impedance were based on the results of previous 1D and 2D inversions. As a result, a correlation has been found between lithospheric low-resistivity blocks and low-velocity or high-absorption domains in most of the regions. This provides a basis for more reliable identification of weak zones and estimation of water fraction content in a fluid or melt. However, not all crustal conductive blocks and layers are fluid-related. It has been shown that high conductivity of the Lower Paleozoic – Proterozoic gold-bearing formations in the Southern Tien Shan is attributed to the presence of related graphite and sulfide inclusions.

KEYWORDS: electromagnetic soundings; magnetotellurics; 2D and 3D inversion; velocities and absorption of seismic waves; fluid content

FUNDING: The study was supported by the RSF (grant No. 24-47-02016, https://rscf.ru/en/project/24-47-02016/).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Ilya N. Lozovsky, i.n.lozovsky@yandex.ru

Received: September 3, 2024 Revised: October 30, 2024 Accepted: November 12, 2024

FOR CITATION: Belyavsky V.V., Varentsov Iv.M., Lozovsky I.N., 2025. Conductive Zones in the Lithosphere of the Fold Belt of Eurasia and Their Relationship to Modern Geodynamic Processes. Geodynamics & Tectonophysics 16 (2), 0815. doi:10.5800/GT-2025-16-2-0815

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ЗОНЫ ЛИТОСФЕРЫ ЕВРАЗИЙСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА: СВЯЗЬ С СОВРЕМЕННЫМИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

В.В. Белявский, Ив.М. Варенцов, И.Н. Лозовский

Центр геоэлектромагнитных исследований, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 108840, Троицк, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлен обобщающий обзор магнитотеллурических (МТ) многолетних исследований литосферы Евразийского складчатого пояса (Северо-Кавказский, Алтае-Саянский, Корякско-Камчатский, Тянь-Шаньский регионы). Полученные результаты способствовали формированию геолого-геофизической основы сейсмического районирования территорий, выявлению активных тектонических структур и поиску месторождений полезных ископаемых. В ходе комплексной интерпретации МТ данных построены региональные геоэлектрические модели, установлена связь аномалий электропроводности с зонами низких скоростей и высокого поглощения сейсмических волн, выделены проводящие глубинные разломы и реологически ослабленные структуры, изучена их связь с положением гипоцентров землетрясений и вулканических объектов различного генезиса. Решение поставленных задач велось с учетом результатов одномерной (1D), двухмерной (2D) и трехмерной (3D) инверсии МТ данных. Инверсиям предшествовал анализ инвариантов импедансного оператора. Стартовые модели, необходимые при решении обратных 3D задач методами подбора или формализованной инверсии всех компонент импеданса (либо его инвариантных параметров), строились на основе предшествующих результатов 1D/2D инверсий. В результате исследований в большинстве регионов установлена корреляция литосферных блоков низкого сопротивления с доменами пониженных скоростей сейсмических волн и/или их повышенного поглощения. Это позволило надежнее выделять ослабленные зоны и оценивать содержание водной фракции флюида или расплава. Однако не всегда коровые проводящие блоки и слои имеют флюидную природу. Показано, что в Южном Тянь-Шане высокая проводимость золотоносных формаций нижнего палеозоя – протерозоя вызвана присутствием связанных включений графита и сульфидов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитные зондирования; магнитотеллурический метод; двухмерная и трехмерная инверсия; скорости и поглощение сейсмических волн; содержание флюида

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено при поддержке РНФ (грант № 24-47-02016, https://rscf.ru/ project/24-47-02016/).

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитотеллурический (МТ) метод основан на определении электрического сопротивления земных недр по операторам линейной связи (передаточным операторам) между различными компонентами естественного переменного электромагнитного (ЭМ) поля Земли [Berdichevsky, Dmitriev, 2009; Varentsov, 2015b]. Высокая энергетика и широкий частотный диапазон этого поля, порождаемого токовыми системами магнитосферы и ионосферы Земли и электрическими разрядами в атмосфере, дают возможность на единой методической основе изучать геоэлектрическую структуру всей тектоносферы. Аномалии высокой электропроводности, связанные с процессами флюидизации и частичного плавления литосферных блоков, служат индикаторами геодинамической активности, позволяя оценить реологические свойства и характеристики напряженно-деформированного состояния земной коры и верхней мантии. Эти оценки, получаемые с учетом результатов сейсмических зондирований, имеют важное значение в современном комплексе геодинамических исследований.

Складчатые системы Евразийского пояса являются уникальной системой активизации континентально-

го Средиземноморско-Азиатского пояса сжатия и сводово-глыбовой Байкальской рифтовой системы, нашедшей свое продолжение в Алтае-Саянском регионе. Здесь, при высоком уровне геодинамической активности, особое значение имеют исследования физико-механических свойств горных пород, проявляющихся в значениях удельного электрического сопротивления (УЭС), скоростей распространения продольных и поглощения поперечных волн. В качестве единого физико-механического процесса рассматривается флюидонасыщение пор и трещин горных пород.

За последние десятилетия в пределах складчатых систем Евразийского пояса накоплен значительный объем сведений о скоростных и электрических параметрах коры и верхней мантии Кавказа, Тянь-Шаня, Памира, Туранской плиты, Алтая-Саянской и Байкальской складчатых областей, Корякии и Камчатки. На основе данных магнитотеллурических и глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ), а также сейсмологических исследований методом обменных волн землетрясений (МОВЗ), выполненных вдоль серии профилей в Северо-Кавказском регионе, разработана методика оценки флюидонасыщенности коры и мантии [Belyavsky, 2007а]. Показана ее эффективность в Алтае-Саянском

и Корякско-Камчатском регионах [Belyavsky, Lozovsky, 2022; Belyavskii, 2021; Belyavsky, 2020b].

Цель глубинных исследований Евразийского складчатого пояса – создание основы для сейсмического районирования территорий и выявление активно развивающихся тектонических структур. Ставились задачи:

 построения геоэлектрических моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, выделения слоев и блоков с аномальными электрическими свойствами, изучения латеральной и глубинной связи выделенных блоков с известными тектоническими и геодинамическими структурами;

 – определения аномальных уровней флюидонасыщения и/или содержания расплава на основе оценок
электрического сопротивления в выделенных блоках
с учетом доступных данных о распределении значений скорости и поглощения сейсмических волн;

 – разработки критериев оценки сейсмической опасности на основе локализации областей повышенного флюидо- и/или расплавонасыщения и определения их пограничных зон с резкими градиентами петрофизических свойств;

 изучения строения очаговых зон землетрясений и вулканических камер.

Интерпретация МТ данных выполнена с помощью эффективных средств 3D моделирования [Druskin, Knizhnerman, 1994], а также 2D и 3D инверсий [Siripunvaraporn et al., 2005; Varentsov, 2015а]. В результате исследований составлены схемы флюидонасыщения ряда регионов Евразийского складчатого пояса.

Прогноз сейсмической опасности требует достоверных данных о глубинном строении очаговых зон землетрясений и литосферных блоков, которые выступают источниками избыточного давления или областями его перераспределения, во многом обусловленного их флюидонасыщением. Сейсмическая активность чаще всего проявляется при сочленении структур с высокими контрастами электропроводности, резкими горизонтальными градиентами скоростей сейсмических волн и/или с существенными различиями в поглощении поперечных волн [Karakin et al., 2003].

Показано, как совместный анализ параметров выделенных электропроводящих блоков, сейсмических волноводов (зон пониженных скоростей) и доменов повышенного поглощения волн позволяет оценить уровень минерализации водной фракции флюида и степень его связанности. В выделенных электропроводящих (в дальнейшем – проводящих) литосферных блоках и слоях содержание водной фракции флюида *c_f* (свободной [Kuzin, 2014], магматической и образовавшейся за счет дегидратации амфиболитсодержащих пород воды [Brown, Mussett, 1984]) определялось с учетом полной [Shankland, Waff, 1977] или частичной [Shimojuku et al., 2014] связанности их долей и возможного появления долей расплава [Pommier, Garnero, 2014].

Также рассмотрен альтернативный пример с присутствием высокопроводящих блоков графитизированных сланцев, не имеющих выраженного дефицита сейсмических скоростей.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Анализу подлежали следующие геофизические данные:

– Северо-Кавказский регион: МТ зондирования ОАО «Центр ЭМИ», ООО «Северо-Запад» и Центра Геон им. В.В. Федынского; материалы МОВЗ-ГСЗ Центра Геон им. В.В. Федынского;

– Алтае-Саянский регион: материалы глубинных сейсмических исследований Центра Геон им. В.В. Федынского, ПГО «Иркутскгеофизика» и СНИИГиМС и МТ зондирования КНИИГиМС;

 – Корякско-Камчатский регион: данные ООО «Северо-Запад» и ОАО «Камчатгеология»;

– Тянь-Шаньский регион: МТ данные АО «Узбекгеофизика».

Первичные МТ материалы были представлены в виде передаточных операторов импеданса [Z] и горизонтального магнитовариационного (MB) отклика [M].

Задачи построения геоэлектрических моделей решались с применением средств 1D [Belyavskii, Sukhoi, 2004], 2D [Varentsov, 2015а] и 3D инверсии импедансных МТ данных [Siripunvaraporn et al., 2005], а также 3D моделирования [Druskin, Knizhnerman, 1994]. Инверсиям предшествовал углубленный анализ инвариантов импеданса [Belyavsky, 2007b; Berdichevsky, Dmitriev, 2009; Varentsov, 2015b]. Определялись размерность и азимуты простирания доминирующих геоэлектрических структур, вычислялись экстремальные импедансные значения Z^{maxH} и Z^{minH} [Counil et al., 1986].

Стартовые модели 2D инверсии основывались на результатах 1D инверсии и априорной геолого-геофизической информации. В ряде случаев вместо фаз импедансов Z^{maxH} и Z^{minH} использовались компоненты фазового тензора [Caldwell et al., 2004; Varentsov, 2015b; Belyavsky, 2017].

Предварительные исследования синтетических данных, полученных в имитационных 3D моделях, показали, что интерпретация профильных МТ/МВ наблюдений средствами 1D или 2D инверсии часто приводит к появлению ложных структур, в то время как 3D инверсия позволяет надежнее восстанавливать объемные структуры, в том числе по одиночным профилям МТ зондирований [Siripunvaraporn et al., 2005], за счет учета всех компонент оператора импеданса.

Начальные модели 3D инверсии интегрировали результаты 1D/2D построений. Несколько их альтернативных вариантов уточнялись путем перебора результатов 3D моделирования в сопоставлении с наблюденными импедансными данными и в ходе дальнейшей формализованной 3D инверсии. Результаты 3D моделирования также использовались для оценки информативности различных компонент оператора импеданса и его экстремальных значений [Belyavsky, 2017]. На имитационных 3D моделях, построенных для Северо-Кавказского и Алтае-Саянского регионов методом интерактивного подбора с использованием программы 3D моделирования Maxwellf [Druskin, Knizhnerman, 1994]), оценивалась устойчивость и разрешающая способность 3D инверсии с использованием программы WSINV3DMT [Siripunvaraporn et al., 2005; Belyavsky, 2020a, 2020b].

В ходе 3D инверсий оценивались невязки модельных и наблюденных компонент тензора импеданса, контролировалось соответствие получаемых геоэлектрических моделей априорным сведениям, выполнялось их сопоставление с результатами сейсмических построений.

Для выделенных проводящих блоков оценивалось содержание водной фракции флюида c_f (в %) с учетом его полной и/или частичной связанности [Belyavskii, 2021; Belyavsky, 2023; Belyavsky, Lozovsky, 2022]. Использовались данные об электрическом сопротивлении водной фракции флюида при его минерализации хлоридом натрия (10–170 г/л), полученные на образцах обводненных кварцитов [Shimojuku et al., 2014] и расплавов с c_m =2–20 % в диапазоне температур 1260–

1440 °С [Pommier, Garnero, 2014] с учетом связанности их капель [Vanyan, Shilovsky, 1983]. Полное содержание флюида в коре и литосферной мантии оценивалось и по аномалиям с дефицитом скорости продольных волн ΔV_p по сравнению с V_p во вмещающих их литосферных структурах [Wyllie et al., 1956].

Аномалии электропроводности, коррелирующие с понижением скоростей сейсмических волн или с их повышенным поглощением, объясняются повышенным флюидонасыщением или частичным плавлением, зависящими от геодинамического состояния литосферных блоков, в частности от присутствия активных глубинных разломов и вулканических камер различного генезиса. В окрестности именно таких блоков часто концентрируются гипоцентры землетрясений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 3.1. Северо-Кавказский регион

В регионе выполнено 14 профилей МТЗ (рис. 1) длиной в несколько тысяч километров с шагом наблюдений 1.5–4.0 км в диапазоне периодов 0.001–1000 с.



Рис. 1. Схема структурного районирования Северо-Кавказского региона.

1 – структурные единицы – впадины: АКВ – Азово-Кубанская, ТКВ – Терско-Кумская; прогибы: ИКП – Индоло-Кубанский, ТКП – Терско-Каспийский, ТП – Таманский; СС – Ставропольский свод, СКМ – Северо-Кавказский краевой массив, МВ – Минераловодский выступ; складчатые области: НС – Новороссийская, ИД – Известковый Дагестан; хребты: ГХ – Главный, ББК – Боковой Большого Кавказа; 2 – профили МТЗ (зеленые линии, I–XIV); 3 – глубина до фундамента (км); 4 – разломы; 5 – надвиги: СФ – Северный фронтальный Восточного Кавказа, ГБК – Главный Большого Кавказа; МН – Минераловодский, НЛ – Нагутско-Лысогоркий; 6 – пункты МТЗ; 7 – грязевые вулканы; города показаны желтыми кружками; 8 – зоны Главного и Передового хребтов. Врезка – расположение пунктов МТЗ в пределах Таманского прогиба и Новороссийской складчатой зоны.

Fig. 1. Structural zoning of the North Caucasus region.

1 – structural units – depressions: – AKB – Azov-Kuban, TKB – Tersk-Kum; troughs: $IK\Pi$ – Indol-Kuban, TKΠ – Tersk-Kaspiysk, TΠ – Taman; CC – Stavropol arch, CKM – North Caucasian marginal massif, MB – Mineralnye Vody protrusion; folded zones – HC – Novorossiysk, IIJ – Izvestkovy Dagestan; ridges – Γ X – Glavny, EEK – Bokovoy, Greater Caucasus; 2 – MT profiles (green lines, I–XIV); 3 – depth to the basement (km); 4 – faults; 5 – thrusts: CΦ – North Eastern Caucasus Frontal, ΓEK – Main Greater Caucasus; MH – Mineralnye Vody, HJ – Nagutsk-Lysogorsk; 6 – MT sites; 7 – mud volcanoes; towns are marked with yellow circles; 8 – Glavnyy and Peredovoy ridge zones. Inset – location of MT sites within the Taman trough and Novorossiysk folded zone.



Рис. 2. Геоэлектрические разрезы (УЭС, Ом·м) вдоль профилей МТЗ в Северо-Кавказском регионе (см. рис. 1). (*a*) – профиль V; (*b*) – профиль X; (*b*) – профиль XII; *1* – пункты МТЗ; *2* – положение глубинных разломов (Т – Тырныаузский, АН – Армавир-Невинномысский, Ч – Черкесский, М – Минераловодский (границы Нальчик-Минераловодской флексурносдвиговой зоны)), НЛ – Нагутско-Лысогорский; *3* – кровля складчатого основания; *4* – кровля кристаллического фундамента; *5* – разломы; *6* – зоны пониженной скорости V_{*p*} на (*a*) [Shempelev et al., 2020]; зоны пониженных на 2–4 % скоростей V_{*p*} (*б*, *в*) [Bulin, Egorkin, 2000; Belyavsky, 2023]; *7* – граница изотермы 600 °С; *8–9* – границы областей высокой (*8*) и менее высокой (*9*) концентрации гипоцентров землетрясений.

Fig. 2. Geoelectric cross-sections (resistivity, $\Omega \cdot m$) along MT profiles in the North Caucasus region (see Fig. 1).

(a) – profile V; (b) – profile X; (c) – profile XII; 1 – MT sites; 2 – deep-seated faults (T – Tyrnyauz, AH – Armavir-Nevinnomyssk, Y – Cherkessk, M – Mineralnye Vody (boundaries of the Nalchik-Mineralnye Vody flexural shear zone)), HJ – Nagutsk-Lysogorsk; 3 – folded basement top; 4 – crystalline basement top; 5 – faults; 6 – low V_p velocity zones (a) [Shempelev et al., 2020]; 2–4 % lower V_p velocity zones (b, b) [Bulin, Egorkin, 2000; Belyavsky, 2023]; 7 – 600 °C isothermal boundary; 8–9 – boundaries of high (b) or less (b) earth-quake hypocenter concentration areas.

На большей части профилей также проводились сейсмические исследования методами МОВЗ и ГСЗ. Максимальная плотность МТ наблюдений достигнута в СВ части Северо-Кавказской моноклинали и на Минераловодском выступе, относящихся к зоне устойчивой сейсмической активности (слабые и умеренные землетрясения). Восточнее, в Нальчик-Минераловодской флексурно-разрывной зоне, поле сейсмичности в плане неоднородно и образует две параллельные зоны повышенной активности с системой крутопадающих сдвиговых нарушений СВ простирания [Milanovsky et al., 1989].

По результатам 3D инверсии [Belyavsky, 2022, 2023; Belyavskii, 2023] построены геоэлектрические разрезы Северо-Кавказского краевого массива (рис. 2, профили V, X и XI). В сечении этого массива (от Тырнаузского глубинного разлома до Армавир-Невинномысского) проводящие блоки погружаются с 5 до 15-20 км (рис. 2, a). В пределах данных блоков амплитуды обменных волн землетрясений уменьшаются в три раза, а скорости продольных волн V_p понижаются на 3–5 % [Shempelev et al., 2020]. Под Главным хребтом Кавказа (вулкан Эльбрус), Минераловодским выступом и вблизи обрамляющих их глубинных разломов [Omelchenko, 2020], на глубинах до 20-50 км, положение проводящих блоков коррелирует с вертикальными зонами пониженных скоростей V_p или/и повышенного поглощения V (рис. 2). Эта корреляция объясняется флюидонасыщением разуплотненных плоскостей надвига коры Скифской плиты на кору южной микроплиты и активизацией глубинных разломов, а под Эльбрусом присутствием флюидов (а глубже 10 км, возможно, и расплава) в жерле и камерах вулкана [Shempelev et al., 2020]. Обрамляющие краевой массив проводящие разломы СЗ простирания (рис. 2, б, в) характеризуются высокой концентрацией гипоцентров землетрясений [Gabsatarova et al., 2018].

Появление водной фракции флюида связывается с фазовыми превращениями минералов и их магматической транспортировкой из мантии. Понижение сопротивления на глубинах с температурой ~600 °С можно объяснить выделением воды из водосодержащих минералов [Brown, Mussett, 1984] или началом частичного плавления гранитных формаций. Необходимая для этого температура ~600 °С достигается на глубине 15-20 км под Ставропольским сводом и Минераловодским выступом в пределах коровых астенолинз [Levin, Kondorskaya, 1998]. Высокая проницаемость шовных зон, ограничивающих Северо-Кавказский краевой массив, также проявляется в повышенной (на четыре порядка по сравнению с фоном) концентрации гелия [Laverov, 2005]. Альтернативная электропроводящая природа высокой проводимости блоков при дефиците скорости продольных волн и их повышенном поглощении маловероятна.

Для выделенных проводящих структур оценено содержание водной фракции флюида *с*_f при его минерализации ~16 г/л. Глубинные разломы и шовные зоны, ограничивающие Северо-Кавказский краевой массив и Минераловодский выступ, характеризуются высоким (2–9%) содержанием c_f на глубине 2–15 км (рис. 3). Высокая концентрация флюида свойственна и пересечениям Главного Кавказского и Ахтырского глубинных разломов с разломами, отделяющими складчатые структуры Кавказа от Таманского и Индоло-Кубанского прогибов. Наиболее высокими значениями c_f (до 15%, рис. 3) и повышенным поглощением сдвиговых обменных волн (в три раза выше фона) характеризуются грязевые вулканы Таманского прогиба и зоны Ахтырского разлома [Belyavskii, 2023; Belyavsky, 2023].

В восточной части Северного Кавказа от Главного хребта Большого Кавказа до Терско-Каспийского прогиба (рис. 3, а, б) на глубине 5–6 км протягиваются слои с c_f =0.6–3.0 %, а аномалии повышенных c_f погружаются на север с 1 до 5 км под Боковой хребет, Аквалинскую моноклиналь и Известковый Дагестан [Belyavsky, 2022]. В эти зоны флюиды могут поступать по системе раздробленных и проницаемых надвигов [Magomedov, 2010]. Высокими c_f (3–5 %) также характеризуется Северный фронтальный надвиг, отделяющий складчатые структуры Восточного Кавказа от Терско-Каспийского прогиба, и Срединный разлом, отделяющий прогиб от Терско-Кумской впадины.

3.2. Алтае-Саянский регион

Алтае-Саянский регион характеризуется интенсивностью сейсмических сотрясений до 8–9 баллов (рис. 4). В его пределах выполнено 16 профилей МТЗ общей длиной свыше 5000 км с шагом наблюдений 1.5– 4.0 км в диапазоне периодов 0.001–3000 с. На большей части профилей велись сейсмические наблюдения методом MOB3. Максимальной плотностью МТ наблюдений охвачены Кызылская впадина, Кузнецко-Алтайская металлогеническая область и зоны концентрации землетрясений: Алтайская, Тээлинская, Шагонарская и Самагалтайская (рис. 4).

Модели, построенные в ходе 3D инверсии импедансных данных на серии профилей (рис. 5), указывают на близость проводящих коровых блоков к активизированным разломам и очагам землетрясений [Belyavsky, 2020a, 2020b; Belyavsky, Lozovsky, 2022]. Оценка содержания флюида в регионе [Belyavsky, Lozovsky, 2022] проведена с учетом адсорбции части ионов солей NaCl на стенках пор [Shimojuku et al., 2014] при реперных значениях величины флюида, оцененных по дефициту V_n МОВЗ/ГСЗ в зонах их корреляции с аномалиями электропроводности. Основная часть гипоцентров землетрясений (рис. 5, 6) расположена над кровлей коровых проводящих блоков и вблизи глубинных разломов с низким сопротивлением – 10–200 Ом⋅м. Проводящие аномалии соответствуют положению зон повышенного затухания обменных волн землетрясений или пониженных скоростей продольных волн.

Высоким 0.5–1.0 % содержанием *с*_f характеризуются блоки, расположенные на глубине 15–25 км под гипоцентрами Тээлинского (03.06.2008, M=4.2), Самагалтайского,



Рис. 3. Распределение связанных долей флюида в Северо-Кавказском регионе. (*a*) – доля флюида *c*_f (в %, кружки с синим контуром); (*б*) – глубина до зон его повышенного содержания (в км, кружки с красным контуром); остальные обозначения – см. рис. 1.

Fig. 3. Distribution of the fluid-associated fractions in the North Caucasus region.

(a) – fluid fraction c_f (%, blue-contoured circles); (6) – depth to zones of high fluid content (km, red-contoured circles); see Fig. 1 for other designations.

Каа-Хемского и Тувинского (27.12.2011, М=6.5) землетрясений (рис. 5, 6), а низким (0.1–0.2 %) c_f – Алтайский (27.09.2003, М=7.3), Большепорожский (10.02.2011, М=6.4) и Урэг-Нурский (Шапшальская зона, 15.05.1970, М=7) очаги, где векторы девиаторного растяжения имеют восточное или ЮВ направление.

К разломам северного, СВ и СЗ простирания с высоким c_j =0.15–1.0 % векторы девиаторного растяжения ориентированы ортогонально [Rebetsky et al., 2013]. Это способствует их наполнению водной фракцией флюида. Повышенной флюидонасыщенностью с c_j = =0.15–0.60 % характеризуются и глубинные разломы (рис. 6), протягивающиеся на север, – Восточно-Шапшальский, Восточно-Кузбасский, Сарасинский, Мартайгинско-Патынский; на северо-запад – Шапшальский, Восточно-Таннуольский, Унгешский, Балыктыг-Хемский, Барлыкский и на северо-восток – Убсунур-Баянкольский, Агардакский. Минимальное содержание флюида ($c_f < 0.1$ %) свойственно глубинным разломам: Башеланскому, Южно-Теректинскому, Курайскому, Хемчикско-Куртушибинскому, Азасскому и Каа-Хемскому, в местах, где девиаторные растяжения ориентированы вдоль них (см. рис. 5).

Повышенное содержание флюида отвечает дефициту скорости продольных волн в 2.0–4.2 % на глубине 10–30 км, например под Кызылской впадиной и ее бортами с c_p =0.3–0.5 % (рис. 6). Под этой впадиной по данным MOB3 и ГСЗ [Bulin, Egorkin, 2000] выделены зоны с дефицитом скорости продольных волн: ΔV_p =0.15 км/с на глубине ~10 км под блоком с V_p =6.15–6.20 км/с и ΔV_p =0.3 км/с на глубине ~35 км под блоком с V_p =7.05 км/с. Им отвечает содержание флюида 0.7–0.9 % в пунктах 26–27 профиля Г–Г (см. рис. 5; рис. 6) и 0.2 % в пунктах 11–12 профиля Д–Д.



Рис. 4. Схема структурно-геологического районирования Алтае-Саянского региона.

1 – глубинные разломы, 2 – профили и пункты МТЗ; 3 – эпицентральные поля очаговых зон землетрясений (1 – Алтайского, 2 – Урэг-Нурского, 3 – Тээлинского, 4 – Каа-Хемского, 5 – Большепорожского, 6 – Шагонарского, 7 – Самагалтайского), звездочки – эпицентры главных событий; 4 – проекция контура низкоскоростного корово-мантийного тела с повышенным тепловым потоком; 5 – температура на глубине 30 км; легенда геологической карты – см. [Belyavsky, Lozovsky, 2022]; прямоугольники (зеленый пунктир) – площади исследований: Кузнецкий Алатау (на севере), Западные Саяны и Тува (в центре) и Горный Алтай (на юге). На врезке – фрагмент карты сейсмического районирования ОСР-2014 и шкала интенсивности сейсмических сотрясений в баллах.

Fig. 4. Structural and geological zoning of the Altai-Sayan region.

1 – deep-seated faults; 2 – MT profiles and sites; 3 – epicentral fields of source zones of earthquakes (1 – Altai, 2 – Ureg-Nur, 3 – Teeli, 4 – Kaa-Khem, 5 – Bolshoy Porog, 6 – Shagonar, 7 – Samagaltay); asterisks mark the epicenters of major events; 4 – contour projection of low-velocity crust-mantle body with high heat flow; 5 – temperature at a depth of 30 km; see [Belyavsky, Lozovsky, 2022] for geological map legend; rectangles (green dashed lines) indicate study areas: Kuznetsk Alatau (north), Western Sayan and Tuva (center), and Altai Mountains (south). Inset shows a fragment of the OSR-2014 seismic zoning map and the earthquake intensity scale.

Высокие значения содержания флюида (0.8 %) под Кызылской впадиной могут быть связаны с растяжением литосферы на глубине более 100 км под Тувинской котловиной, лежащей на продолжении Байкальской рифтовой зоны [Kurgankov, 2001]. Блок литосферы под Кызылской впадиной опускается со скоростью 0.4 мм/год, а ее борта испытывают подъем до 1 мм/год. Это подтверждается томографической моделью (МОВЗ-ГСЗ), в которой домен с $\Delta V_{\rho} \approx 2.5$ % [Zolotov et al., 2006] расположен под впадиной глубже 100 км.

Результаты исследований в регионе позволяют сделать следующие выводы: основная часть гипоцентров землетрясений расположена над системой стыкующихся вытянутых проводящих блоков и вблизи глубинных разломов с *c_f* = =0.06–1.00 %;

 проводящие зоны коррелируются с доменами повышенного затухания обменных волн землетрясений и пониженных скоростей продольных волн (по данным МОВЗ-ГСЗ), что свидетельствует о повышенной пористости и обводненности блоков коры в очаговых зонах землетрясений;

– минимальное содержание *c*_{*f*}=0.08–0.10 % свойственно разломам (см. рис. 5), вдоль которых ориентированы



Рис. 5. Содержание флюида в низкоомных блоках земной коры, выделенных на глубине более 5 км в Алтае-Саянском регионе. Стрелки – направления растягивающих напряжений [Rebetsky et al., 2013]; зеленые эллипсы – эпицентральные поля очаговых зон землетрясений (см. рис. 4); жирные пунктирные линии – разломы: Восточно-Кузбасский (ВК), Мартайгинско-Патынский (МП), Сарасинский (СР), Шапшальский (ШП), Убсунур-Баянкольский (УБ), Восточно-Таннуольский (ВТ), Восточно-Шапшальский (ВШ), Барлыкский (БР), Балыктыг-Хемский (БХ), Унгешский (УН) и Агардакский (АГ).

Fig. 5. Fluid content in the low-resistivity crustal blocks, identified at depths greater than 5 km in the Altai-Sayan region. Arrows indicate the directions of extensional stresses [Rebetsky et al., 2013]; green ellipses show the epicentral fields of earthquake source zones (see Fig. 4); bold dashed lines represent faults: East Kuzbass (BK), Martaiga-Patyn (MΠ), Sarasa (CP), Shapshal (ШП), Ubsunur-Bayankol (УБ), East Tannu-Ola (BT), East Shapshal (BШ), Barlyk (БР), Balyktyg-Khem (БХ), Ungesh (УН), and Agardak (АГ).



Рис. 6. Результаты 3D инверсии инвариантных значений тензора импеданса вдоль профилей МТЗ А-А и Г-Г (см. рис. 4). Малые звездочки – гипоцентры землетрясений с М=1.5–3.0, зарегистрированных в период работ МОВЗ; большие звездочки – гипоцентры землетрясений с М>6 (Тээлинское и Шагонарское на профиле Г-Г, Тээлинское на профиле А-А); эллипсы – зоны

повышенного затухания обменных волн (сплошные линии) и волноводы (штриховка); сверху – номера профилей МТЗ, названия структурных единиц и глубинных разломов.

Fig. 6. Results of the 3D inversion of impedance tensor invariants along MT profiles A–A and Γ – Γ (see Fig. 4).

Small asterisks denote hypocenters of the M=1.5–3.0 earthquakes recorded during the ECWM seismic study. Large asterisks indicate hypocenters of earthquakes with magnitudes greater than 6 (Teeli and Shagonar on profile Γ – Γ , and Teeli on profile A–A). Ellipses mark regions with enhanced damping of converted waves (solid lines) and waveguides (dashed lines); at the top: MT site numbers and names of structural units and deep-seated faults.

растягивающие девиаторные напряжения [Rebetsky et al., 2013].

3.3. Корякско-Камчатский регион

Блоки литосферы с высоким объемным содержанием флюида с, и расплава с выделены (рис. 7) по результатам МТ зондирований [Belyavskii, 2021] на пересечении субмеридиональных структур Олюторско-Восточно-Камчатской зоны с широтными структурами (Императорская и Алеутская вулканические дуги). В их окрестности происходит разгрузка тектонических напряжений. Величины флюидонасыщения и/или расплава здесь отвечают наблюдаемому дефициту скорости продольных волн [Fedotov, 2006]. Под Южно-Камчатским прогибом на глубине ~35 км (температура ~800 °С) выделены блоки с *с*_{*i*}=1.6–2.4 % (зона 5). Дальнейшая миграция флюида вдоль вулканических систем и ослабленных зон коры приводит к росту с, на глубине 13-15 км до 1.5-2.0 %. Флюидонасыщенные области коррелируются с зонами высокой сейсмической и гидротермальной активности, что свойственно областям поддвига океанической коры под континентальную. Под Прибрежным горстом глубже 70 км формируется расплав с с_m=1.5-3.0 % в субдуцированных океанических породах.

Под Начикинской грабенообразной структурой (зона 4), характеризующейся высокой вулканической и сейсмической активностью, на глубине более 40 км выделяется проводящий и низкоскоростной мантийный блок с долей расплава с_т до 1.5-3.0 % в обводненных породах зоны пересечения субдукционных и вулканических структур Императорской дуги. Блок с повышенным содержанием расплава (и/или флюида с *с*_{*е*}=0.7–1.0 %) прослеживается под Хавывенским погребенным поднятием и действующими вулканами (Безымянный, Толбачинский, Ключевской и Шивелучский; зоны 2-3) и Олюторско-Восточно-Камчатской структурно-формационной зоной (СФЗ). На глубине 10 и 30 км (вблизи границы Мохо, при температуре ~800 °C) выделяются блоки с c_i =1–2 % или c_m =5–10 %, интерпретируемые как зоны вулканической и сейсмической активности западного окончания Алеутской дуги, погружающейся под Хавывенское погребенное поднятие. Расположенный на глубине 20 км домен с ΔV_p =1.2 км/с [Fedotov, 2006] и V_p =6.6 км/с характеризуе́тся *с*_≈1 %.

Севернее Хайрюзовского и Усть-Камчатского глубинных разломов (зоны 7, 11, рис. 7), в областях снижения сейсмической и вулканической активности, на глубине 50 км c_f снижается до 0.12–0.20 %. Между Охотской и Баренцовой плитами, под межплитными разломами МП1 и МП2, на глубине 5–40 км, c_f =0.7–0.2 %. Вдоль эпицентрального поля Ильпырского землетрясения (2013 г., М>5.8; зона 8, рис. 7), на глубине от 20 до 40 км, c_f =0.5 %.

Гипоцентры Ильпырского (2013 г., M>5.8), Хаилинского (1991 г., M=6.6) и Олюторского (2006 г., M=7.6) землетрясений (зоны 1 и 8), расположенные на глубине 10–30 км над проводящими блоками, характеризующимися насыщением флюида c_f =0.2–0.6 % или расплавом c_m =2.0–4.5 %. Под относительно сейсмически спокойным Корякским нагорьем (зона 10), на глубине 10 км, c_f =0.12–0.16 %, а глубже 50 км, где температура превышает 1000 °С, c_m достигает 1.6–3.5 %. Под Пенжинской впадиной блок с c_f =0.3–0.4% поднимается до 10– 15 км (зона 12), в то время как под Омолонским массивом проводимость возрастает глубже 60 км (рис. 7).

Построенные 3D геоэлектрические модели дают возможность оценить в данном регионе степень флюидонасыщения и частичного плавления [Belyavskii, 2021]. Показано, что MT метод позволяет картировать активизированные глубинные и региональные разломы, проницаемые литосферные блоки и вулканические камеры различного генезиса с содержанием флюида c_f в пределах 0.3–2.0 % и расплава с c_m =2.5– 10.0 %, а также выделять очаги землетрясений на периферии этих зон.

На основе представленных распределений содержания флюида и расплава можно сделать следующие выводы:

– в зонах активной вулканической деятельности
с,≥1 %, а в очаговых зонах землетрясений *с*,=0.2–0.5 %;

– глубинные разломы в зонах контакта литосферных плит и структурно-формационных зон характеризуются *c_j*=0.13–0.2 %, а в пределах замыкания вулканических дуг – 0.3–1.0 %;

– под восточным побережьем Камчатки на глубине свыше 30 км выделяются нижние камеры вулканов с c_m =3–10 %, приуроченные к местам пересечения активизированных структур СЗ простирания (Алеутская, Императорския вулканические дуги) и СВ простирания (Авачинская и Ключевская группы вулканов).

3.4. Среднеазиатский регион

Геоэлектрическая модель Среднеазиатского региона строилась на основании 1D–2D инверсий [Belyavsky, Varentsov, 1998] и 2D–3D моделирования МТ данных [Azarov et al., 1998]. Интерпретировались максимальные



Рис. 7. Распределение (а) – флюида и (б) – расплава в литосфере Корякско-Камчатского региона.

На схеме тектонического районирования: 1 – срединные массивы, платформы, породы мафического ряда, верхнемеловые офиолитовые формации и вулканиты; 2 – кайнозойские прогибы; 3 – границы Центрально-Камчатского вулканического пояса; 4 – границы поднятий, впадин, СФЗ и их названия: ОМ – Омолонский массив, О-В-К – Олюторско-Восточно-Камчатская СФЗ, П-З-К – Пенжинско-Западно-Камчатская СФЗ, У-С – Укэлаятско-Срединный массив, СВ – Срединный выступ. Структуры второго порядка: КН – Корякское нагорье, НГ – Начикинский грабен, ПВ – Пенжинская впадина, ПГ – Прибрежный горст, ХПП – Хавывенское погребенное поднятие, Ю-К – Южно-Камчатский прогиб. Вулканические дуги: Им – Императорская, Ал – Алеутская; 5а – глубинные разломы: ГК – Главный Камчатский, МП1 и МП2 – межплитные, У-К – Усть-Камчатский, Ха – Хайрюзовский, Ши – Шивелучский; 5б – разломы и зоны повышенной сейсмичности; 6 – границы главных тектонических элементов; 7а – объем водной фракции флюида c_f в коровом блоке (верхний ряд, %) и его глубина (нижний ряд, км); 7б – c_f в мантийном блоке (средний ряд) и его глубина (нижний ряд, км), верхний ряд – значение c_m для расплавов насыщенного перидотита и базальта; 8 – объем водной фракции в отдельных разломах (%); 9 – номера областей определения флюидона-сыщения и расплава; 10 – эпицентры катастрофических землетрясений: Ил – Ильпырское, Хл – Хаилинское, Ол – Олюторское, Кр – Корякское; 11 – основные действующие вулканы: Шв – Шивелучский, Кл – Ключевская сопка, Бз – Безымянный, Тл – Толбачинский.

Fig. 7. Distribution of fluid (*a*) and melt (*b*) in the lithosphere of the Koryak-Kamchatka region.

On the tectonic zoning map: 1 – median massifs, platforms, mafic rocks, Upper Cretaceous ophiolite formations, and volcanites; 2 – Cenozoic troughs; 3 – boundaries of the Central Kamchatka Volcanic Belt; 4 – boundaries of uplifts, depressions, structural-facies zones (SFZ), and their names: OM – Omolon massif, O-B-K – Olyutorka-East Kamchatka SFZ, Π-3-K – Penzhin-West Kamchatka SFZ, Y-K – Ukelayat median massif, CB – Median protrusion. Second-order structures: KH – Koryak uplift, HΓ – Nachikinsky graben, ΠB – Penzhina depression, ΠΓ – Pribrezhny horst, XΠΠ – Khavyven buried highland, Ю-K – South Kamchatka trough. 5a – deep-seated faults: ΓK – Main Kamchatka, MΠ1 and MΠ2 – interplate, Y-K – Ust-Kamchatka, Xa – Khairyuzov, Ши – Shiveluch; 56 – high seismicity faults and areas; 6 – boundaries of major tectonic elements; 7a – volume of water fraction of fluid c_f in the crustal block (upper row, %) and its depth (lower row, km); 76 – c_f in the mantle block (middle row) and its depth (lower row, km), upper row – c_m value for saturated peridotite and basalt melts; 8 – volume of water fraction in some faults (%); 9 – numbers of areas for estimating fluid saturation and melt; 10 – epicenters of catastrophic earthquakes: $H\pi$ – Ilpyr, $X\pi$ – Khailino, $O\pi$ – Olyutorka, Kp – Koryak; 11 – major active volcanoes: IIIB – Shiveluch, $K\pi$ – Klyuchevskaya Sopka, B3 – Bezymianny, $T\pi$ – Tolbachik.

и минимальные инвариантные кривые МТЗ, с разделением на продольные (р^{II}) и поперечные (р^{__}). В результате исследований составлена карта глубин до кровли верхнего проводящего слоя в пределах Тянь-Шаньского региона, Памира и южной части Туранской плиты.

В пределах Кызылкумского сектора Южного Тянь-Шаня положение кровли верхнего проводящего слоя (1D инверсия кривых р^{II}) контролируется [Azarov et al., 1998] глубиной залегания графитизированных нижнепалеозойских комплексов с УЭС 0.3–5.0 Ом⋅м (рис. 8). Черносланцевые проводящие формации нижнего палеозоя представлены метаосадками с первичным содержанием органического вещества до 0.5–2.0 %. Повышение температуры до 300–400 °С и умеренное давление привели к их графитизации, а дислокационное сжатие – к формированию кливажа со связанными вкраплениями графитовых зерен.

На рис. 9, а, приведена геоэлектрическая модель вдоль профиля I (см. рис. 8), секущего структуру Мурунтау, а на рис. 9, б, – вдоль параллельного, более протяженного профиля, также секущего структуру Мурунтау в пунктах 160-161, Бухарскую ступень - в пунктах 173-174, Кустанайско-Кураминский плутоновулканический пояс – в пунктах 150–153 и Сырдарьинскую впадину - в пунктах 144-147. В пределах Южного Тянь-Шаня и Бухарской ступени комплексы с суммарной коровой продольной проводимостью, достигающей 6000 См на глубине 10-20 км, также определяются [Azarov et al., 1998] по результатам 2D инверсии главных компонент горизонтального МВ оператора [Varentsov, 2015a, 2015b], а под Сырдарьинской впадиной по результатам 3D моделирования на глубине ~10 км выделяются блоки с суммарной коровой продольной проводимостью до 3000 См.



Рис. 8. Центральные Кызылкумы: карта глубин залегания графитизированного золотоносного комплекса «Мурун» (зеленые изолинии, данные бурения и геологии) и кровли проводящих аномалий (синие изолинии, данные МТЗ). Цифры в кружках – структуры (1 – Бельтауская, 2 – Ауминзинская) и рудные поля (3 – Мурунтауское, 4 – Амантайтауское); серые малые кружки – пункты МТЗ; красная линия – положение МТ профиля I; темно-зеленым и темно-синим цветом выделены изолинии, отвечающие глубине 1 км.

Fig. 8. Central Kyzyl Kum region: maps of the depth of occurrence of the graphitized gold-bearing Murun Complex (green isolines, drilling and geological data) and the top of conductive anomalies (blue isolines, MT data).

Numbers in circles indicate structures (1 – Beltau, 2 – Auminza) and ore fields (3 – Muruntau, 4 – Amantaitau); small gray circles represent MT sites; the red line marks the position of MT profile I; dark green and dark blue isolines correspond to a depth of 1 km.



Рис. 9. Результаты интерпретации МТ данных в Центральных Кызылкумах.

(*a*) – результаты 1D инверсии (УЭС, Ом·м) кривых р[∥] вдоль профиля I (см. рис. 8), пересекающего Мурунтауское месторождение золота; (*б*) – результаты 2D инверсии вдоль параллельного профиля (УЭС, Ом·м); (*в*) – геологический разрез. *1* – кровля проводящего пирит-углеродистого комплекса «Мурун» (по данным 1D инверсии); *2* – проводящие аномалии, отвечающие комплексу «Мурун»; *3* – номера пунктов МТЗ; *4*–*12* – геологические комплексы.

Fig. 9. The results of MT data interpretation for the Central Kyzyl Kum region.

(*a*) – results of 1D inversion (resistivity, $\Omega \cdot m$) of invariant ρ^{\parallel} curves along profile I (see Fig. 8), which intersects the Muruntau gold deposit; (*b*) – results of 2D inversion along the parallel profile (resistivity, $\Omega \cdot m$); (*b*) – geological cross-section. *1* – top of the conductive pyrite-carbonate complex "Murun" (based on the 1D inversion data); *2* – conductive anomalies corresponding to the "Murun" complex; *3* – MT site numbers; *4–12* – geological complexes.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный обзор 3D геоэлектрических моделей, построенных в пределах Евразийского складчатого пояса, и результатов их комплексного геолого-геофизического толкования показывает, что картирование блоков литосферы с повышенной электропроводностью и оценка в них флюидонасыщения или степени частичного плавления позволяют обоснованно выделять активизированные и проницаемые глубинные разломы, реологически ослабленные блоки и слои, вулканические камеры различного генезиса. Появляется возможность характеризовать региональную геодинамическую активность и прогнозировать расположение областей напряженного состояния земных недр и возможных очагов землетрясений. В работе также показана значимая роль зон повышенной электропроводности при выделении блоков, перспективных на рудопроявления.

Надежность представленных оценок содержания флюида определяется не только достоверностью получаемых распределений электрического сопротивления, но и дополнительным учетом региональных петрофизических моделей изменения пористости с глубиной, степени связанности флюидных капель и частиц графита/сульфидов в проводящих цепях, сведениями о минерализации земных вод и данными по скоростям и поглощению сейсмических волн. Надо отметить, что погрешности определения степени минерализации водных долей флюида в пределах региона ведут к обратно пропорциональному смещению оценок содержания *c*_f в пределах всей рассматриваемой территории, но существенно не влияют на выводы о тектонической активности проводящих блоков.

Дальнейшее, более детальное, изучение представленных регионов современными методами синхронного магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования [Azarov et al., 1998; Berdichevsky, Dmitriev, 2009; Varentsov, 2015a, 2015b] позволит повысить надежность сейсмического районирования, а развертывание сетей МТ мониторинга может улучшить прогнозирование сейсмических и вулканических событий.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам из 000 «Северо-Запад», ОАО «Центр ЭМИ», КНИИГиМС, ОАО «Камчатгеология», АО «Узбекгеофизика», ФГУП «Центр Геон им. В.В. Федынского», ПГО «Иркутскгеофизика» и СНИИГиМС за предоставленные материалы. Авторы благодарят рецензентов за конструктивные замечания, позволившие улучшить текст статьи.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.В. Белявский – концептуализация, инверсия МТ данных и комплексное геолого-геофизическое истолкование результатов, написание текста, предварительная подготовка иллюстраций, итоговые выводы. И.М. Варенцов – концептуализация, средства 2D инверсии и консультации по их применению, редактирование текста, итоговые выводы. И.Н. Лозовский – редактирование текста, итоговая подготовка иллюстраций.

V.V. Belyavsky – conceptualization, MT data inversion, comprehensive geological and geophysical interpretation of results, writing, preliminary figure preparation, and final conclusions. I.M. Varentsov – conceptualization, 2D inversion tools and consultations on their application, text editing, and final conclusions. I.N. Lozovsky – text editing and final figure preparation.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью. Авторы прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript. The authors read and approved the final manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Аzarov I.Ya., Belyavsky V.V., Berdichevsky M.N., Borisova V.P., Burakhovich T.K., Vanyan L.L., Varentsov I.M., Golubtsova I.S. et al., 1998. Geoelectric Model of the Tectonosphere of the Fold Belt of Eurasia and Adjacent Areas. Znanie, Kiev, 264 p. (in Russian) [Азаров И.Я., Белявский В.В., Бердичевский М.Н., Борисова В.П., Бурахович Т.К., Ваньян Л.Л., Варенцов И.М., Голубцова И.С. и др. Геоэлектрическая модель тектоносферы Евразийского складчатого пояса и сопредельных территорий. Киев: Знание, 1998. 264 с.].

Belyavskii V.V., 2021. Electrical Conductivity and Fluid Distribution in the Koryak–Kamchatka Region. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 57, 492–507. https://doi.org/10.1134/S1069351321040030.

Belyavskii V.V., 2023. Geoelectric Model of the Northwestern Caucasus: Three-Dimensional Inversion. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 59, 175–189. https://doi.org/ 10.1134/S1069351322060027.

Belyavskii V.V., Sukhoi V.V., 2004. The Method of Audio-Frequency Magnetotelluric Sounding in Mineral Exploration. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 40 (6), 515–533. Belyavsky V.V., 2007a. Geoelectric Model of the Tectonosphere of the Northern Caucasus. GERS, Tver, 250 p. (in Russian) [Белявский В.В. Геоэлектрическая модель тектоносферы Северо-Кавказского региона. Тверь: ГЕРС, 2007. 250 с.].

Belyavsky V.V., 2007b. The Use of Invariant MTS Curves in Deep Magnetotelluric Studies. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 43, 237–244. https://doi.org/10.1134/S1069 351307030081.

Belyavsky V.V., 2017. 3D Interpretation of the Magnetotelluric Data. Use of Invariant Characteristics of the Impedance Matrices and Tellurian and Magnetic Matrices. LAP, Saarbrücken, 564 p. (in Russian) [Белявский В.В. Трехмерная интерпретация магнитотеллурических данных. Использование инвариантных характеристик матриц импеданса, теллурической и магнитной матриц. Саарбрюккен: LAP, 2017. 564 с.].

Belyavsky V.V., 2020a. Geoelectric Model of the Altai-Sayan Region (3D Inversion). 3D Modeling of Electromagnetic Fields in Constructing Geoelectric Models of the Earthquake Source Zones. LAP, Saarbrücken, 208 p. (in Russian) [Белявский В.В. Геоэлектрическая модель Алтае-Саянского региона (трехмерная инверсия). Трехмерное моделирование электромагнитных полей при построении геоэлектрических моделей очаговых зон землетрясений. Саарбрюккен: LAP, 2020. 208 с.].

Belyavsky V.V., 2020b. Three-Dimensional Inversion of Magnetotelluric Data in Study of Focal Zones of Earthquakes in the South of the Altai-Sayan Region. Russian Geology and Geophysics 61 (1), 79–95. https://doi.org/10.15372/RGG 2019104.

Belyavsky V.V., 2022. Geoelectric Model of the Eastern Caucasus (Three-Dimensional Inversion). Geophysics 2, 64– 69 (in Russian) [Белявский В.В. Геоэлектрическая модель Восточного Кавказа (трехмерная инверсия) // Геофизика. 2022. № 2. С. 64–69]. https://doi.org/10.34926/ geo.2022.10.31.001.

Belyavsky V.V., 2023. Geoelectric Model of the Central Part of the Northern Caucasus and Its Fluid Saturation. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 59, 565–585. https://doi.org/10.1134/S1069351323040018.

Belyavsky V.V., Lozovsky I.N., 2022. Fluid Saturation in the Lithosphere of the Altai-Sayan Folded Region According to Magnetotelluric Data. Russian Geology and Geophysics 63 (1), 85–97. https://doi.org/10.2113/RGG202 04211.

Belyavsky V.V., Varentsov Iv.M., 1998. Geoelectric Model Along the Garabekewül–Arys Profile. In: Geoelectric Model of the Tectonosphere of the Fold Belt of Eurasia and Adjacent Areas. Znanie, Kiev, p. 67–85 (in Russian) [Белявский В.В., Варенцов Ив.М. Построение геоэлектрической модели вдоль профиля Карабекаул-Арыс // Геоэлектрическая модель тектоносферы складчатых поясов Евразии и сопредельных территорий. Киев: Знание, 1998. С. 67–85].

Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I., 2009. Models and Methods of Magnetotellurics. Nauchny Mir, Moscow, 680 p. (in Russian) [Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.].

Brown G.C., Mussett A.E., 1984. The Inaccessible Earth. Mir, Moscow, 262 p. (in Russian) [Браун Д., Массет А. Недоступная Земля. М.: Мир, 1984. 262 с.].

Bulin N.K., Egorkin A.V., 2000. Regional Forecasting of Oil-and-Gas Potential of the Subsurface from the Deep-Seated Seismic Criteria. GEON, Moscow, 194 p. (in Russian) [Булин Н.К., Егоркин А.В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М.: Центр ГЕОН, 2000. 194 с.].

Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C., 2004. The Magnetotelluric Phase Tensor. Geophysical Journal International 158 (2), 457–469. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X. 2004.02281.x.

Counil J.L., le Mouel J.L., Menvielle M., 1986. Associate and Conjugate Directions Concepts in Magnetotellurics. Annales Geophysicae. Series B. Terrestrial and Planetary Physics 4 (2), 115–130.

Druskin V., Knizhnerman L., 1994. Spectral Approach to Solving Three-Dimensional Maxwell's Diffusion Equations in the Time and Frequency Domains. Radio Science 29 (4), 937–953. https://doi.org/10.1029/94RS00747.

Fedotov S.A., 2006. Magmatic Feeding Systems and Mechanism of Volcanic Eruptions. Nauka, Moscow, 455 p. (in Russian) [Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.].

Gabsatarova I.P., Koroletsky L.N., Ivanova L.E., Selivanova E.A., 2018. The May 2, 2012 Zavetnenskoe Earthquake with K_p =11.2, Mw_{reg} =4.3, I_0^{P} =5 and the December 15, 2012 Vorovskolesskoe-II Earthquake with K_p =10.8, Mw_{reg} =4.2, I_p =4 (Stavropol Territory). Earthquakes of the Northern Eurasia 21 (2012), 323–331 (in Russian) [Габсатарова И.П., Королецкий Л.Н., Иванова Л.Е., Селиванова Е.А. Землетрясения Заветненское 2 мая 2012 г. с K_p =11.2, Mw_{per} =4.3, I_0^{P} =5 и Воровсколесское-II 15 декабря 2012 г. с K_p =10.8, Mw_{per} =4.2, I_p =4 (Ставропольский край) // Землетрясения Северной Евразии. 2018. № 21 (2012). С. 323–331].

Karakin A.V., Kuryanov Yu.A., Pavlenkova N.I., 2003. Faults, Fractured Zones and Waveguides in the Upper Layers of the Earth's Shell. VNIIGeosystem, Moscow, 221 p. (in Russian) [Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: ВНИИгеосистем, 2003. 222 с.].

Кurgankov P.P., 2001. Geodynamic Setting of Seismically Active Areas of the Altai-Sayan Region and a Problem of Inracontinental Rifting. In: Geology and Mineral Resources of the Central Siberia. Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources, Krasnoyarsk, p. 31–44 (in Russian) [Курганьков П.П. Геодинамическая обстановка сейсмоактивных районов Алтае-Саянской области и проблема внутриконтинентального рифтогенеза // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 31–44].

Kuzin A.M., 2014. Fluid Component in the Process of Formation of Jointing and Ruptured Zones. Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields 5, 43–50 (in Russian) [Кузин А.М. О флюидной составляющей процесса образования зон трещиноватости и разрывных нарушений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014. № 5. С. 43–50].

Laverov N.P. (Ed.), 2005. Seismoactive Fluid-Magmatic Systems of the Northern Caucasus. IPhE RAS, Moscow, 225 p. (in Russian) [Сейсмоактивные флюидно-магматические системы Северного Кавказа / Ред. Н.П. Лаверов. М.: ИФЗ РАН, 2005. 225 с.].

Levin L.E., Kondorskaya N.V., 1998. Seismicity of the Central Mediterranean Belt of Eurasia in Regard to the Development of the Oil-and-Gas Complex. Prospect and Protection of Mineral Resources 2, 28–31 (in Russian) [Левин Л.Э., Кондорская Н.В. Сейсмичность центральной части Средиземноморского пояса Евразии в связи с проблемой развития нефтегазового комплекса // Разведка и охрана недр. 1998. № 2. С. 28–31].

Magomedov R.A., 2010. Geodynamic Regime in the Area of the Dagestan Wedge in the Alpine Development of the Eastern Caucasus. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center RAS 56, 66–80 (in Russian) [Магомедов Р.А. Геодинамический режим области Дагестанского клина в Альпийском цикле развития Восточного Кавказа // Труды Института геологии ДНЦ РАН. 2010. Вып. 56. С. 66–80].

Milanovsky E.E., Rastsvetaev L.M., Kukhmazov S.U., Birman A.S., Kudrin N.N., Simako V.G., Tveritinova T.Yu., 1989. Neogeodynamics of the Elbrus-Mineralnye Vody Area of the Northern Caucasus. In: Geodynamics of the Caucasus. Nauka, Moscow, p. 99–105 (in Russian) [Милановский Е.Е., Расцветаев Л.М., Кухмазов С.У., Бирман А.С., Курдин Н.Н., Симако В.Г., Тверитинова Т.Ю. Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. С. 99–105].

Оmelchenko V.L., 2020. On the Deep Seated Faults in the Northern Caucasus. Lithosphere 20 (1), 130–142 (in Russian) [Омельченко В.Л. О глубинных разломах на Северном Кавказе // Литосфера. 2020. Т. 20. № 1. С. 130– 142]. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-1-1 30-142.

Pommier A., Garnero E.J., 2014. Petrology-Based Modeling of Mantle Melt Electrical Conductivity and Joint Interpretation of Electromagnetic and Seismic Results. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 119 (5), 4001–4016. https://doi.org/10.1002/2013JB010449.

Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V., 2013. Stress State and Deformation of the Earth's Crust in the Altai-Sayan Mountain Region. Russian Geology and Geophysics 54 (2), 206–222. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011.

Shankland T.J., Waff H.S., 1977. Partial Melting and Electrical Conductivity Anomalies in the Upper Mantle. Journal of Geophysical Research 82 (33), 5409–5417. https://doi. org/10.1029/JB082i033p05409.

Shempelev A.G., Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Shamanovskaya S.P., Rogozhin E.A., 2020. Tectonic Fragmentation and Geodynamic Regime of Elbrus and Kazbek Volcanoes (Central Caucasus, Russia): Results of the Deep Geophysical Research. Geotectonics 54, 652–664. https://doi.org/10. 1134/S0016852120050088.

Shimojuku A., Yoshino T., Yamazaki D., 2014. Electrical Conductivity of Brine-Bearing Quartzite at 1 GPa: Implications for Fluid Content and Salinity of the Crust. Earth, Planets and Space 66, 2. https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-2.

Siripunvaraporn W., Egbert G., Uyeshima M., 2005. Interpretation of Two-Dimensional Magnetotelluric Profile Data with Three-Dimensional Inversion: Synthetic Examples. Geophysical Journal International 160 (3), 804–814. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02527.x.

Vanyan L.L., Shilovsky P.P., 1983. Deep Conductivity of Oceans and Continents. Nauka, Moscow, 86 p. (in Russian) [Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. М.: Наука, 1983. 86 с.].

Varentsov I.M., 2015a. Methods of Joint Robust Inversion in MT and MV Studies with Application to Synthetic Datasets. In: V.V. Spichak (Ed.), Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior. Second Edition. Elsevier, p. 191–229. https:// doi.org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00008-8. Varentsov I.M., 2015b. Arrays of Simultaneous Em Soundings: Design, Data Processing, Analysis, and Inversion. In: V.V. Spichak (Ed.), Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior. Second Edition. Elsevier, p. 271–299. https://doi. org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00010-6.

Wyllie M.R.J., Gregory A.R., Gardner L.W., 1956. Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media. Geophysics 21 (1), 41–70. https://doi.org/10.1190/1.143 8217.

Zolotov E.E., Kadurin I.N., Rakitov V.A., Lopatin Yu.K., Treusov A.V., 2006. Teleseismic Tomography Model of the Altai-Sayan Region Along the KVARTS Geotraverse. In: Geophysics of the XXI Century: The Year of 2005. Proceedings of the Fedynsky 7th Geophysical Readings (March 3–5, 2005). Nauchny Mir, Moscow, p. 71–76 (in Russian) [Золотов Е.Е., Кадурин И.Н., Ракитов В.А., Лопатин Ю.К., Треусов А.В. Телесейсмическая томография Алтае-Саянского региона по геотраверсу КВАРЦ // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сборник трудов Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского (3–5 марта, 2005 г.). М: Научный мир, 2006. С. 71–76].