



ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ СЕЛЕНГИНСКОЙ ДЕПРЕССИИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Н.Н. Неведрова¹, А.М. Санчаа¹, Е.А. Щекаева²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты интерпретации уникальных архивных данных вертикальных электрических зондирований, полученных в Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны в 50-х гг. прошлого века партией Байкальской геофизической экспедиции ПГО «Иркутскгеофизика», с использованием современных компьютерных технологий. Целью этой работы является уточнение геоэлектрических характеристик разрезов по профилям измерений, а также строения таких сейсмоактивных структур как Дельтовый и Фофановский разломы, залив Провал, Творогово-Истокское поднятие с использованием программ 2–3D инверсии с наглядной визуализацией данных.

Байкальская рифтовая зона, Селенгинская депрессия, вертикальные электрические зондирования, Дельтовый и Фофановский разломы, 2D, 3D инверсия

3D MODEL OF THE SELENGA DEPRESSION OF THE BAIKAL RIFT ZONE

N.N. Nevedrova¹, A.M. Sanchaa¹, E.A. Shchekaeva²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

The article presents the results of the interpretation of unique archival data of vertical electrical soundings obtained in the Selenga basin of the Baikal rift zone in the 50s of the last century by the detachment of the Baikal geophysical expedition of the PGO "Irkutskgeofizika", using modern computer technologies. The purpose of this work is to refine the geoelectric characteristics of the sections according to the measurement profiles, as well as the structure of such seismically active structures as the Delta and Fofanovsky faults, the Proval Bay, the Tvorogovo-Istok uplift using a 2–3D inversion program with visual data visualization.

Baikal rift zone, Selenga depression, vertical electrical soundings, Delta and Fofanov faults, 2D, 3D inversion

ВВЕДЕНИЕ

Байкальская рифтовая зона (БРЗ) в целом состоит из системы впадин и сопряженных с ними горных поднятий. Именно знания о строении впадин – о характеристиках разломных нарушений, мощности накопившихся в них осадков, рельефе поверхности фундамента – позволяют получить представление о геологических этапах развития всей рифтовой области. Одна из самых крупных впадин, Селенгинская депрессия, длиной в 100–120 км и шириной в 40–45 км расположена на юго-восточном берегу озера

Байкал. В нее входит дельта р. Селенга и прилегающие к ней заселенные районы с промышленной инфраструктурой. Депрессия относится к кайнозойским впадинам байкальского типа и является наиболее сейсмоактивной в БРЗ. Следует отметить, что до сих пор Селенгинская депрессия считается недостаточно изученной структурой побережья озера Байкал, что связано в основном с труднодоступностью отдельных участков дельты, существованием сильно заболоченных территорий.

В настоящее время продолжают глубинные процессы, вследствие которых образовалась впадина и окаймляющие ее хребты, вызывая многочисленные землетрясения. В связи с возможностью на территории Селенгинской депрессии катастрофических разрушительных землетрясений уточнение ее строения и выделение активных разломов является актуальной задачей.

В статье представлены результаты повторной интерпретации уникальных архивных данных вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), полученных в Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой зоны в 50-х гг. прошлого века партией Байкальской геофизической экспедиции ПГО «Иркутскгеофизика» (Н.Ф. Пятчин, А.П. Булмасов, В.И. Косов, В.Т. Вебер). Исследования с использованием этих данных проводились в ИНГГ СО РАН в 90-х гг. прошлого столетия и были связаны с образованием Байкальского прогностического полигона в районе поселков Энхалук–Стволовая.

Для изучения строения полигона, включающего восточную часть Селенгинской депрессии и залив Провал, помимо ВЭЗ привлекались другие геоэлектрические методы: глубинные зондирования становлением электромагнитного поля (ЗСБ), магнитотеллурические зондирования (МТЗ), верхняя часть разреза изучалась с помощью детальных ЗСБ с передвижным источником. Интерпретация данных ВЭЗ в те годы была выполнена с применением программы СОНЕТ (НГУ) в рамках горизонтально-слоистой модели среды. Результаты были представлены в ряде статей [Дашевский и др., 1999; Морозова и др., 1999; Неведрова, 2013].

Большой вклад в исследования депрессии в разные годы внесли специалисты Института земной коры СО РАН, представившие в своих работах геологические, геодинамические особенности строения, а также анализ сейсмической активности территории [Солоненко, 1981; Лунина, 2015; Мац, Ефимова, 2017; Лунина и др., 2021].

В настоящее время с появлением современных компьютерных технологий – программных средств двух- и трехмерной интерпретации – появилась возможность заново проинтерпретировать архивный материал ВЭЗ, полученный в Селенгинской депрессии. Целью этой статьи является уточнение геоэлектрических характеристик разрезов по профилям измерений, а также строения таких сейсмоактивных структур как Дельтовый и Фофановский разломы, залив Провал, Творогово-Истокское поднятие с использованием программ 2–3D инверсии с наглядной визуализацией данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фундамент Селенгинской депрессии и горное обрамление представлены древними кристаллическими образованиями архейского, протерозойского и нижнепалеозойского возрастов. Осадочные отложения, заполняющие впадину, имеют неогеновый и четвертичный возраст [Саркисян, 1958]. Судя по геофизическим данным, максимальная мощность кайнозойских отложений отмечается в сторону оз. Байкал [Солоненко, 1981]. По оценкам В.В. Федынского мощность кайнозойских осадков в депрессии составляет 5 км [Ушаков и др., 1972]. Последующие сейсмологические исследования, а также интерпретация результатов более детальных гравиметрических съемок позволяют полагать, что

мощность осадков на северо-западном краю дельты может достигать 7 км [Зорин, 1971] (рис. 1, а). Таким образом, оценки, полученные разными методами, сильно отличаются и нуждаются в верификации.

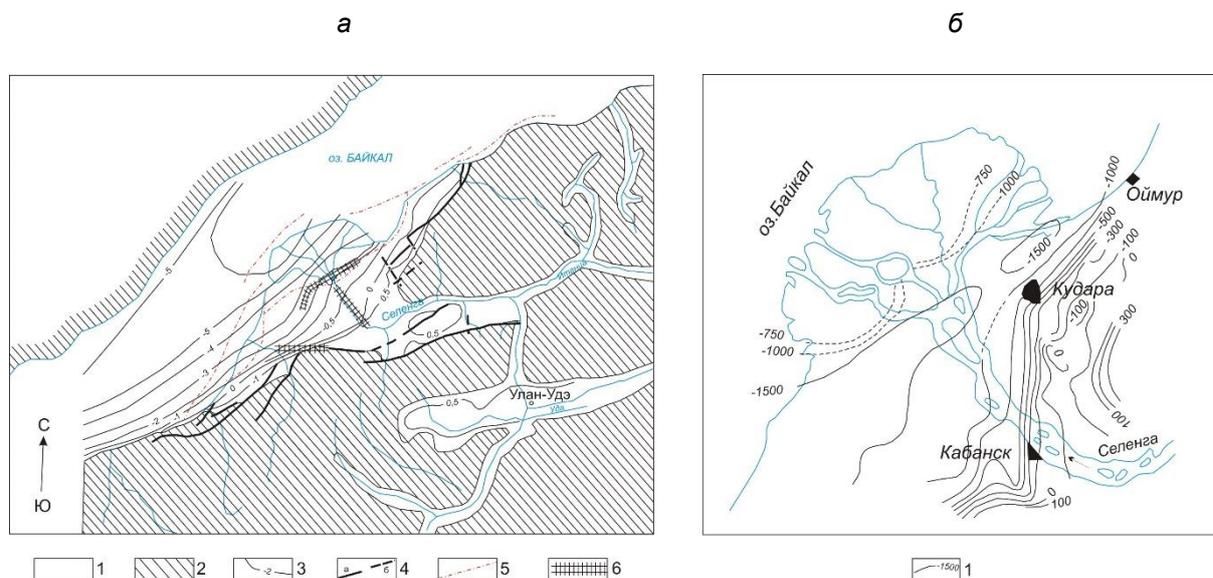


Рис. 1. а – карта глубинного строения дельты р. Селенги (составлена Ю.А. Зориным): 1 – Кайнозойские отложения, 2 – породы фундамента, 3 – изогипсы кристаллического фундамента (по гравиметрическим данным и результатам наблюдений со станции “Земля”; разломы, обновленные в кайнозое: 4 – выраженные в наземном рельефе (а – установленные, б – предполагаемые), 5 – скрытые под рыхлыми отложениями и водами оз. Байкал; 6 – зоны высоких горизонтальных градиентов силы тяжести, соответствующие разломам: I – Дельтовому, II – Хамар-Дабанскому, III – Фофановскому; б – схематическая карта рельефа поверхности фундамента Селенгинской депрессии по результатам интерпретации данных ВЭЗ (составлена А.П. Булмасовым): 1 – изолинии глубин до фундамента

Дельтовый разлом относится к главным сейсмоактивным элементам депрессии. Он прослеживается по гравиметрическим данным в северо-восточном направлении по линии пос. Творогово – пос. Кудара – мыс. Облом залива Провал. Ему соответствует зона больших горизонтальных градиентов силы тяжести, которая отражает резкое изменение мощности рыхлых отложений по простиранию разлома. По данным магниторазведки, Дельтовый разлом выделяется цепочкой линейно-вытянутых магнитных аномалий, которые могут быть связаны с докайнозойскими интрузиями [Булмасов, 1968; Зорин, 1971].

Фофановский разлом протягивается в северо-западном направлении ортогонально Дельтовому вдоль русла р. Селенга, вблизи поселков Берегово, Кабанск, Творогово. По данным гравиразведки, он выделяется слабо, что связано с небольшой вертикальной амплитудой разлома. Магниторазведкой выявлена узкая магнитная аномалия, секущая структуры фундамента вкрест простирания. В районе поселка Красный Яр аномалия меняет свое направление на северо-восточное, что, по всей видимости, происходит в результате появления древних интрузивных тел [Зорин, 1971; Солоненко, 1981].

На площади Селенгинской депрессии в 50-х гг. прошлого столетия было выполнено около 170 ВЭЗ с установкой Шлюмберже. Минимальный разнос генераторной линии составлял 6 м, а ее максимальные размеры достигали 10–16 км. Палеточная интерпретация данных ВЭЗ проведена в те годы А.П. Булмасовым, точность которой он оценил в 15–20 %. Одним из результатов является схематичная карта рельефа поверхности фундамента (рис.1, б).

Современные исследования депрессии проводятся в Институте земной коры СО РАН. Ведущим специалистом в области структурной геологии д.г.-м.н. О.В. Луниной составлена более детальная карта

разломно-блокового строения Селенгинской впадины. Она выделяет еще один разлом, параллельный Дельтовому, а Фофановский разлом продляет после пересечения с Дельтовым в сторону оз. Байкал, с направлением, немного смещенным на северо-восток [Мац, Ефимова, 2017; Лунина и др., 2021].

Очень высокая сейсмическая активность территории Селенгинской депрессии в пределах Байкальского рифта подтверждается сведениями об исторических землетрясениях. Самое сильное за последние 150 лет Цаганское землетрясение, значительно изменившее структуру дельты с образованием залива Провал, произошло 12 января 1862 г. ($M \sim 7.5$). Эпицентр события предполагается в районе этого залива. Основные макросейсмические последствия землетрясения, хорошо описанные и проанализированные, наблюдались в зоне Дельтового разлома. В его зоне произошли и другие сильные землетрясения прошлого столетия, в ходе которых образовались заливы Посольский и Истокский сор, аналогичные заливу Провал [Сейсмотектоника..., 1968; Голенецкий и др., 1995].

На рисунке 2 представлена карта эпицентров землетрясений за текущий 2022 г., на которой видно, что и в этом году на территории Селенгинской депрессии уже произошло большое число землетрясений достаточно высокого энергетического класса (<http://seis-bykl.ru>).

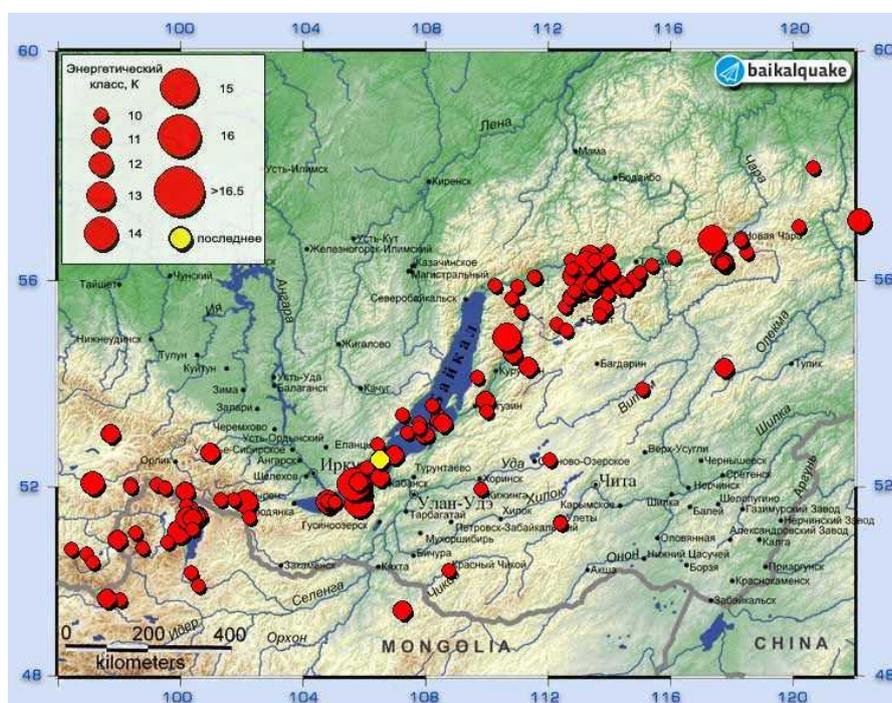
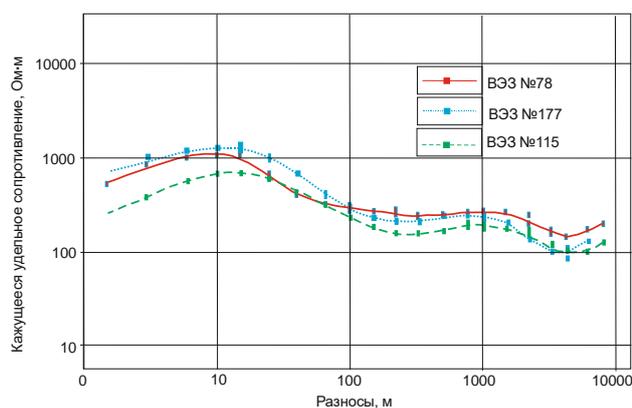
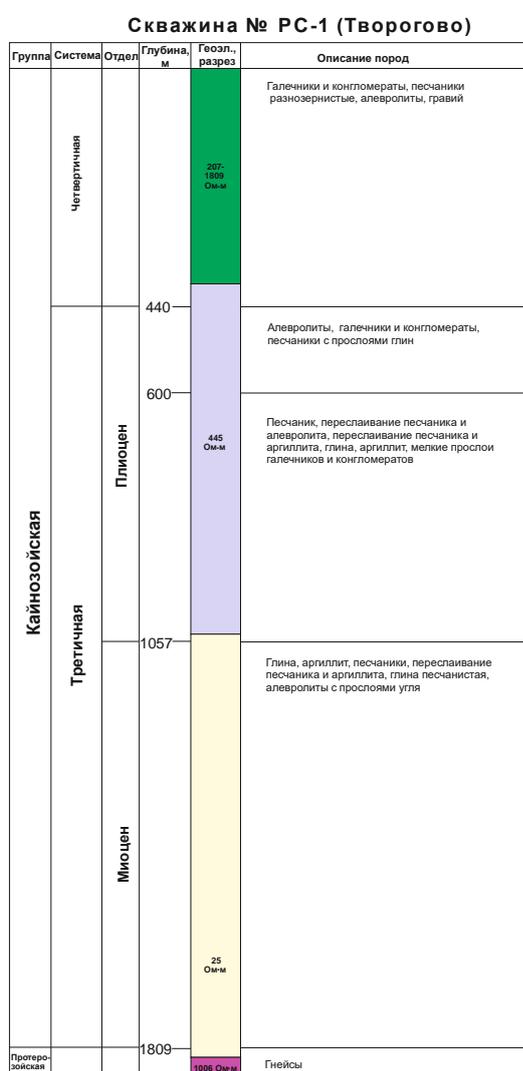


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений за 2022 год

В результате исследований 50-х гг. прошлого века на территории Селенгинской депрессии получены полевые данные ВЭЗ хорошего качества с погрешностями в пределах 5–6 %. В результате анализа этих данных, выполненного в 90-х гг., было установлено, что более 70 % кривых ВЭЗ позволяют провести интерпретацию с использованием горизонтально-слоистой модели. Остальной объем полевого материала составляли зондирования с видимыми искажениями полевых кривых на больших разносах ($AB/2 > 5000$ м). Было выяснено, что искажения обусловлены, в основном, сложным рельефом фундамента. Искажения были классифицированы и оценены. Также наблюдается небольшое число кривых с различным характером искажения по отношению к графикам зондирования над горизонтально-слоистой моделью [Мандельбаум и др., 1996а, б; Дашевский и др., 1999].

Все пункты ВЭЗ были размещены по профилям. Расстояние между пунктами ВЭЗ составляло в среднем 2.5 км (в отдельных местах до 7 км), между профилями – от 3 до 5 км. Всего в ходе работы над этой статьей для интерпретации было привлечено 150 кривых ВЭЗ.

Для обоснования интерпретационной модели Селенгинской депрессии были использованы различные априорные данные, из которых наиболее важными являются данные глубоких скважин, достигших докайнозойского фундамента. В первую очередь рассмотрены скважины в пос. Творогово (РС-1) и Колесово (РС-2). Скважины РС-1 и РС-2 пробурены на участках депрессии с существенно разной мощностью осадочного заполнения. В частности, скважина РС-1 находится в зоне Дельтового прогиба, а скважина РС-2 вскрыла фундамент в южной, менее глубокой части дельты [Солоненко, 1981]. Геоэлектрические модели по данным пунктов ВЭЗ, расположенных в районе этих скважин, были подобраны с учетом литологических характеристик и известных мощностей стратиграфических подразделений.



Модель среды для ВЭЗ №78		Модель среды для ФЭЗ №177		Модель среды для ВЭЗ №15	
Сопrotивление, Ом.м	Мощность, м	Сопrotивление, Ом.м	Мощность, м	Сопrotивление, Ом.м	Мощность, м
1 456	1.28	1 594	1.06	1 200	1.17
2 1890	5.5	2 1500	13	2 1033	8.5
3 303	71	3 335	43	3 300	41
4 207	317	4 170	177	4 129	240
5 445	651	5 372	591	5 286	753
6 25	780	6 21	881	6 23	1008
7 1006		7 1402		7 347	

Средняя погрешность: 5.51 % Средняя погрешность: 3.97 % Средняя погрешность: 3.74 %

Рис. 3. Согласование геоэлектрических моделей ВЭЗ с данными скважины РС-1 (Творогово)

В качестве примера на рис. 3 представлена скважинная колонка для скважины РС-1 и подобранные геоэлектрические модели. Скважина вскрыла кристаллический фундамент, представленный гнейсами на глубине 1809 м. На фундаменте залегают отложения миоцена мощностью в 712 м, характеризующиеся переслаиванием тонкослоистых глин, аргиллитов, песчаников, относящихся к

низкоомным породам. Вверх по разрезу в отложениях плиоцена общей мощностью в 618 м наряду с глинами и песчаниками присутствуют слои галечников и конгломератов, которые повышают значения УЭС. Наиболее неоднородные по литологическому составу четвертичные отложения составляют 440 м разреза и представлены конгломератами, галечниками, гравием, слоями песка с УЭС в широком диапазоне значений. Мощности и удельные электрические сопротивления горизонтов геоэлектрической модели неплохо соответствуют скважинным данным. Все кривые ВЭЗ, полученные в окрестности скважины, одного типа, погрешности подбора при инверсии данных составляют 4–5 % [Неведрова, 2013].

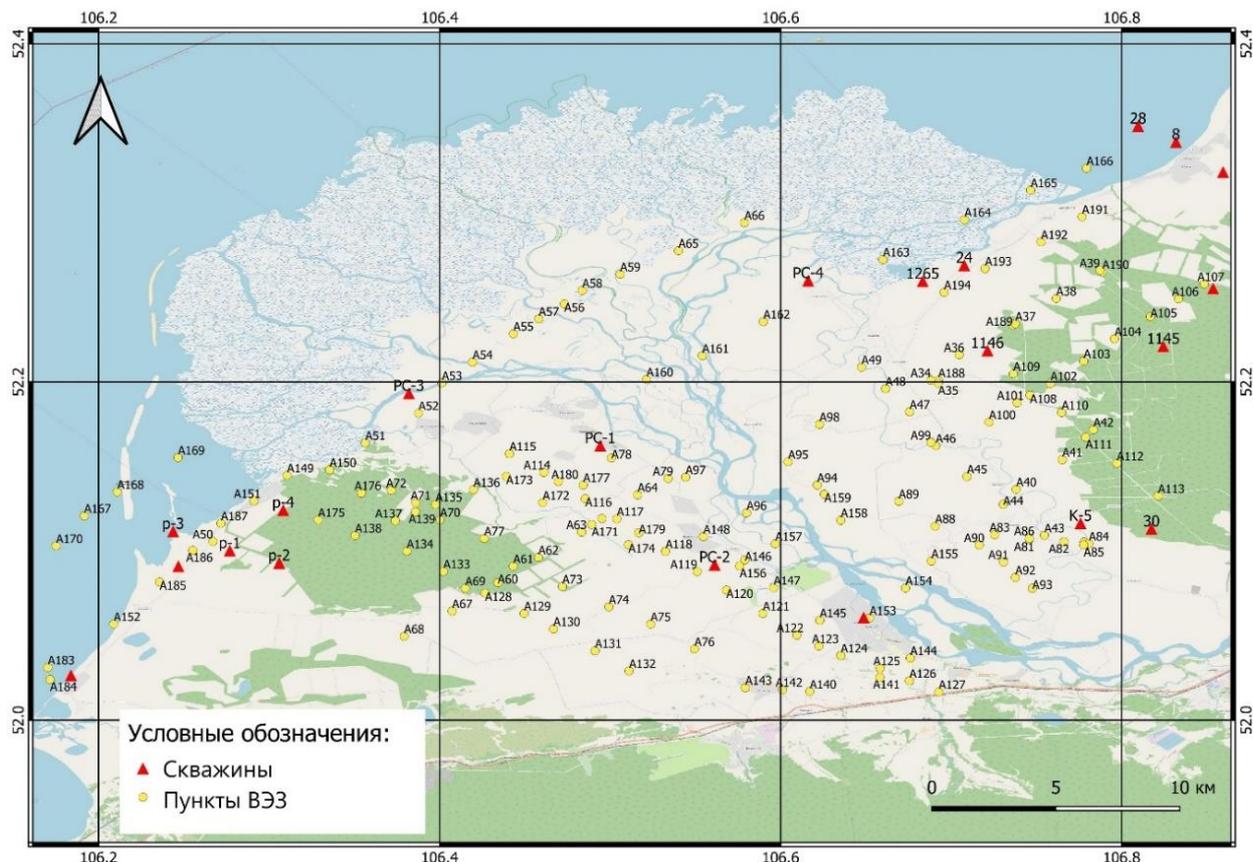


Рис. 4. Схема расположения пунктов ВЭЗ и скважин в Селенгинской депрессии

На рисунке 4 представлена схема расположения пунктов ВЭЗ и скважин на территории Селенгинской депрессии.

Для интерпретации данных ВЭЗ использован программный комплекс Zond Software (<http://zond-geo.ru>). На первом этапе интерпретация была выполнена в рамках горизонтально-слоистой модели среды. На втором этапе привлечены программы двух- и трехмерной инверсии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

По результатам интерпретации данных ВЭЗ в рамках горизонтально-слоистой среды были получены геоэлектрические модели в каждом пункте зондирования. На рисунке 5 представлена трехмерная модель рельефа опорного горизонта (фундамента) Селенгинской депрессии по результатам одномерной интерпретации. Выделяется зона Дельтового разлома, Фофановский разлом, трассирующийся в северо-западном направлении в сторону озера Байкал, Твороговское поднятие.

По данным геоэлектрики Дельтовый разлом выделяется широкой полосой, которая в структурной геологии называется зоной или областью динамического влияния разлома [Шерман и др., 1983], включающей значительное количество блоков и разломов различных рангов. В целом, это протяженная область, где поднятия чередуются с зонами наибольшего прогиба опорного горизонта (фундамента) депрессии. Мощность осадочного чехла на отдельных участках прогибания превышает 4500 м. Ширина разломной зоны достигает 10 км.

Пунктирной линией на рис. 5 показан Фофановский разлом, который выделяется вдоль линии, разделяющей блоки с разной глубиной залегания опорного горизонта.

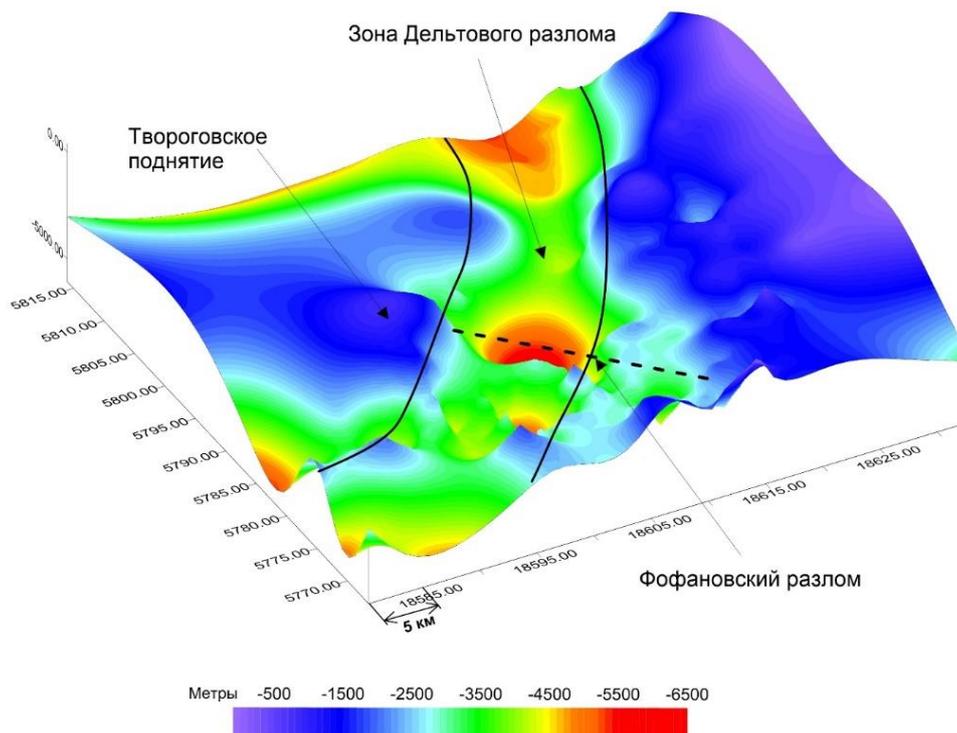


Рис. 5. Трехмерная модель рельефа опорного горизонта (фундамента) Селенгинской депрессии по данным ВЭЗ

На северо-западном участке дельты наблюдается приподнятый блок фундамента – Твороговское поднятие, ограниченное с юго-востока тектоническими структурами, субпараллельными Дельтовому разлому. Мощность осадочной толщи в пределах Твороговского поднятия не превышает двух километров. По данным геоэлектрики выяснено, что оно отделено от Истокского выступа прогибом. В этом случае по данным ВЭЗ удалось значительно уточнить строение северо-западной области дельты. Ранее эта область называлась Творогово-Истокским поднятием [Солоненко, 1968].

Далее была выполнена 2D инверсия данных с помощью программы Zondres2D. На рисунке 6 представлена 3D визуализация полученных двумерных разрезов, по которой можно оценить изменения УЭС по простиранию разрезов, мощности осадочных пород и интервал значений УЭС для основных структурных единиц депрессии. Трехмерная визуализация дает возможность проследить области поднятия фундамента в сторону Фофановской кристаллической перемычки – это разрезы в юго-восточной части депрессии по профилям северо-восточного (пр. 12, 13, 14, 15) и юго-восточного (пр. 7, 8, 9) простирания.

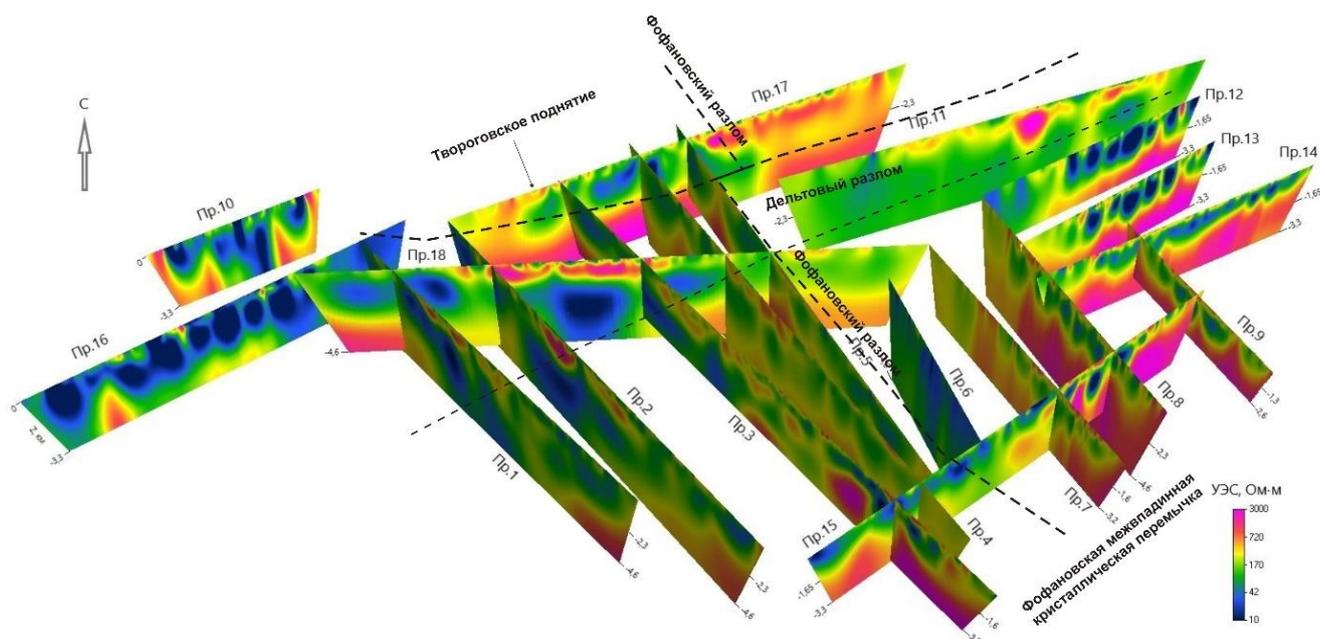


Рис. 6. 3D визуализация результатов 2D инверсии по профилям Селенгинской депрессии

Твороговское поднятие хорошо выделяется на разрезе по профилю 17 в его юго-западной части. Зоны максимального погружения фундамента наблюдаются в области Дельтового разлома (пр. 18), а также на разрезах по профилям 10 и 16 юго-западного простирания в сторону Усть-Селенгинской мезозойской впадины.

УЭС осадочных отложений существенно различно по площади депрессии, что связано, по всей видимости, с изменением литологического состава пород как миоценового, так и плиоценового возраста и согласуется с данными скважин. Наиболее низкоомные зоны проявляются на юго-западе и северо-востоке депрессии. Например, по данным скважины в районе п. Творогово миоценовые отложения представлены в большей степени алевролитами, глинистыми и песчаными породами с низким УЭС, в то время как по данным скважины в районе п. Колесово эти породы представлены песками, песчаниками, гравелитами с более высокими значениями УЭС. Аналогичные закономерности наблюдаются и для пород плиоценового возраста.

Далее по данным ВЭЗ профилей 1–5 выполнена трехмерная инверсия. Результаты представлены на рис. 7 в виде срезов трехмерной модели по трем направлениям. Северо-западная часть модели отражает распределение УЭС в зоне Дельтового активного разлома, где наблюдаются области пониженных значений УЭС (10–100 Ом·м) и большие глубины до фундамента (> 4.5 км). В юго-восточной части модели в сторону Фофановской кристаллической перемычки видны приподнятые блоки фундамента, кровля которого залегает неглубоко (2000–2500 м), что согласуется с результатами 1D и 2D инверсий. В верхней части модели практически везде выделяются протяженные интервалы повышенных значений сопротивлений. Скорее всего, это обусловлено наличием конгломератов четвертичного или плиоценового возраста на глубинах до 500 м, а также присутствием многолетнемерзлых пород. Области низких сопротивлений (10–100 Ом·м), судя по глубинам, соответствуют миоценовым отложениям, а интервалы пониженных значений УЭС в породах фундамента относятся к разломным зонам.

На основе 1D интерпретации, 2D, 3D инверсий всего объема архивных данных ВЭЗ построен рельеф кровли фундамента, разрезы по всем профилям измерений с трехмерной визуализацией и трехмерная геоэлектрическая модель участка Селенгинской депрессии. 3D модель включает юго-западную часть Дельтового разлома.

По всем полученным результатам можно сделать следующие выводы. Опорный горизонт выделяется по значениям УЭС в интервале от 700 до 3500 Ом·м (оттенки красного цвета). Зоны с более низкими значениями УЭС в опорном горизонте соответствуют разломным структурам. По геологическим данным опорный горизонт представлен породами фундамента протерозойского и архейского возраста. Залегающая выше низкоомная толща миоценовых отложений соответствует значениям УЭС в интервале от 20 до 70 Ом·м. В верхней литологически очень неоднородной части разреза присутствуют горизонты со значениями УЭС в широком диапазоне значений.

В структурном плане хорошо выделяется Твороговское поднятие, зоны как крупных (Дельтовый, Фофановский), так и более мелких разломов. Выделенные разломы хорошо согласуются с геологическими данными, полученные в том числе специалистами ИЗК СО РАН [Lunina, Denisenko, 2020], результатами прошлых исследований другими геофизическими и геологическими методами. К главным особенностям строения депрессии можно отнести мощный осадочный чехол (от 2 и > 4.5 км), а также существенно блоковое строение осадочного заполнения и фундамента, обусловленное многочисленными разнонаправленными разломными нарушениями. Таким образом, не стоит говорить о какой-то конкретной мощности осадков в Селенгинской депрессии, настолько дробно они дислоцированы.

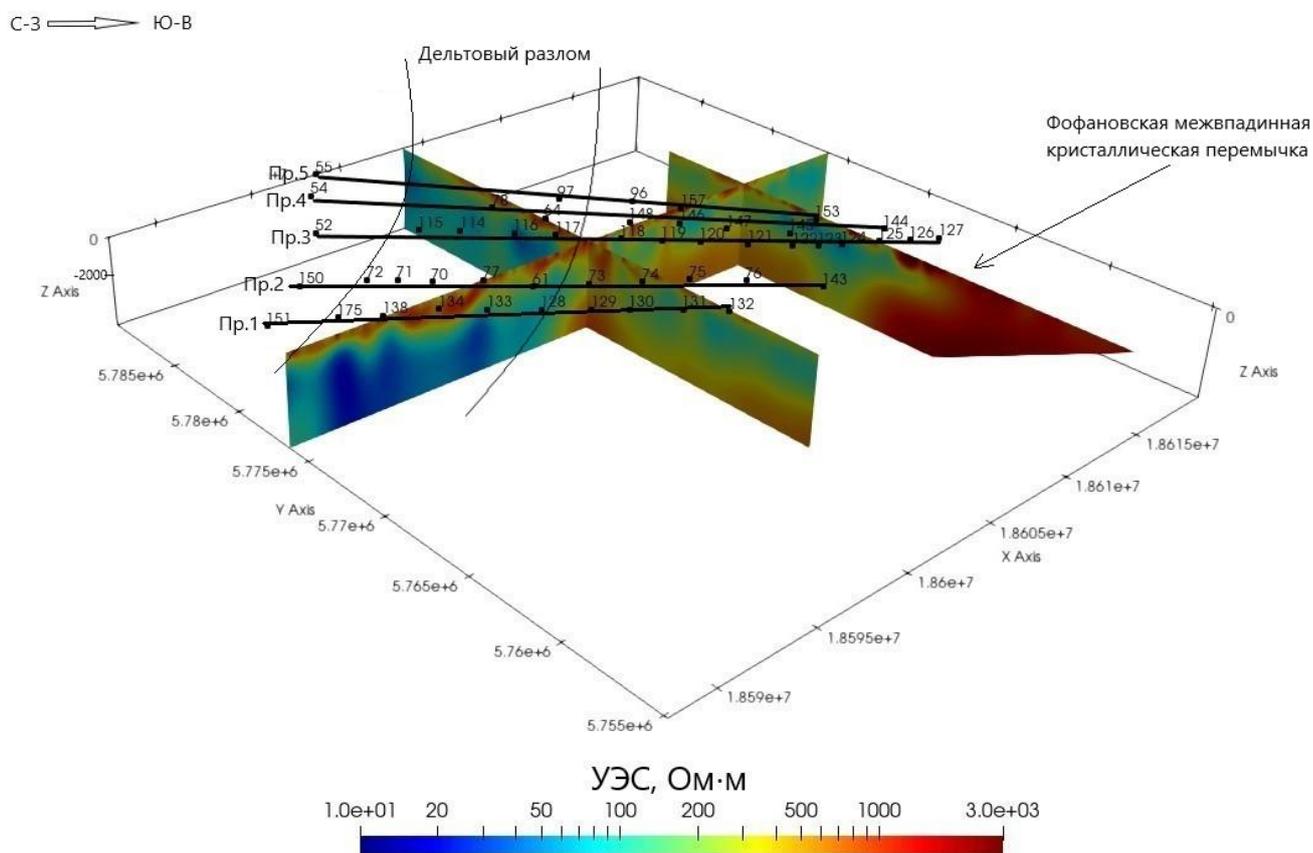


Рис. 7. Результат 3D инверсии. Трехмерная геоэлектрическая модель юго-западного участка Селенгинской депрессии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Байкальскую рифтовую зону входит значительное число разновеликих впадин. Несмотря на различные размеры и состав отложений, впадины имеют много общих черт геологического строения. Общим для всех рифтовых бассейнов является их четкая морфологическая выраженность, стратиграфическая характеристика осадочного чехла, характерные геофизические аномалии. К общим чертам относится также влияние мезозойских и кайнозойских тектонических движений на формирование впадин, которые резко отличались по своему характеру и привели к сложному сочетанию разнородных дислокаций, во многом зависящих от свойств древнего фундамента и мезо-кайнозойского осадочного покрова [Флоренсов, 1960]. Вместе с тем, у каждой впадины есть особенности строения, характерные только для нее. Например, большинство кайнозойских депрессий существенно различаются размерами, максимальной мощностью осадочного заполнения.

Селенгинская депрессия относится к наиболее ранним по заложению структурам БРЗ, она начала формироваться в начале рифтогенеза, так как именно в дельте в процессе бурения вскрыты наиболее древние в БРЗ осадки [Парфеевец, Саньков, 2006]. Параллельно с геологическими исследованиями впадины на ее территории применялись различные геофизические методы. Именно они позволяют изучить глубинную внутреннюю структуру этих сложнопостроенных объектов. По результатам электроразведочных работ 1951–1955 гг. методом ВЭЗ с разносами до 16 км, выполненных в нескольких впадинах, включая Селенгинскую, наряду с сейсморазведкой гравитационной, магнитной съемкой, были получены первые представления о глубинном строении впадин. Но палеточная интерпретация, единственно возможная в те годы, не позволила полноценно использовать уникальные данные ВЭЗ с такими большими разносами. Применение современных двумерных и трехмерных программ для интерпретации электромагнитных данных особенно актуально для сложнопостроенных неоднородных по литологическому составу объектов, какими являются все тектонические впадины.

В статье наглядное представление о глубинном строении Селенгинской депрессии получено с применением новых подходов к интерпретации данных ВЭЗ с использованием 2–3D программных средств инверсии. Уточнены геоэлектрические характеристики отдельных тектонических элементов: внутривпадинных перемычек и прогибов, разломных структур, что поможет продвинуться в понимании этапов формирования депрессии и роли геодинамических процессов, влияющих на внутреннее строение впадины в мезозойско-кайнозойское время.

Работы выполнены при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0025.

ЛИТЕРАТУРА

- Булмасов А.П.** Некоторые особенности геофизических полей и структуры земной коры Прибайкалья // Байкальский рифт: Сб. статей. – М.: Наука, 1968. – С.113–123.
- Голенецкий С.И., Ружич В.В., Дреннова Г.Ф., Емельянова И.А.** Ощутимые и сильные землетрясения района дельты Селенги и толчок 13 июля 1993 г. // Вулканология и сейсмология. – 1995. – № 4–5. – С. 215–223.
- Дашевский Ю.А., Неведрова Н.Н., Морозова Г.М., Грехов И.О., Поторочина Н.Г.** Тензочувствительные объекты в геоэлектрическом разрезе Байкальского прогностического полигона как индикатор подготовки сейсмических событий // Геология и геофизика. – 1999. – № 40 (3). – С. 409–421.

- Зорин Ю.А.** Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории. – М.: Наука, 1971. – 168 с.
- Лунина О.В.** Разломы плиоцен-четвертичной активизации юга восточной Сибири и их роль в развитии сейсмически индуцированных геологических процессов. Дис. ... докт. геол.-мин. наук: 25.00.03. – Иркутск, 2015. – 359 с.
- Лунина О.В., Денисенко И.А., Гладков А.А.** Особенности вертикальных смещений вдоль Дельтового разлома при Цаганском землетрясении 1862 г. на Байкале // Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле». – 2021. – № 37. – С. 70–86, doi: 10.26516/2073-3402.2021.37.70.
- Мандельбаум М.М., Эпов М.И., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Ельцов И.Н.** Сейсмическая активность и динамика электропроводности земной коры на Байкальском прогностическом полигоне // Геология и геофизика. – 1996а. – № 37 (6). – С. 88–94.
- Мандельбаум М.М., Дашевский Ю.А., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Грехов И.О., Мартынов А.А.** Технология геоинформационных систем при решении обратной задачи глубинных электрических зондирований // Геофизика. – 1996б. – № 1. – С. 29–37.
- Мац В.Д., Ефимова И.М.** Геологическая история Байкала // Природа. – 2017. – № 3. – С. 13–27.
- Морозова Г.М., Дашевский Ю.А., Неведрова Н.Н., Грехов И.О.** Глубинное распределение электропроводности и поле напряжений в земной коре Байкальского прогностического полигона // Геология и геофизика. – 1999. – № 40 (3). – С. 332–345.
- Неведрова Н.Н.** Геоэлектрическое строение и вариации электропроводности по данным электромагнитных зондирований с контролируруемыми источниками: на примере регионов Сибири. Дис. ... докт. геол.-мин. наук: 25.00.10. – Новосибирск, 2013. – 360 с.
- Пакет программ ZOND**, <http://zond-geo.ru>.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А.** Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго–западной части Байкальской рифтовой системы. – Новосибирск: Академическое изд–во "Гео", 2006. – 149 с.
- Саркисян С.Г.** Мезозойские и третичные отложения Прибайкалья, Забайкалья и Дальнего Востока. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 337 с.
- Сейсмотектоника** и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. – М.: Наука, 1968. – 217 с.
- Солоненко В.П.** Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт: Сб. статей. – М.: Наука, 1968. – С. 57–71.
- Солоненко В.П.** Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья. – Новосибирск: Наука, 1981. – 169 с.
- Ушаков С.А., Федынский В.В., Шабалин Н.А.** Геофизические данные о природе рифтовых зон // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. – 1972. – № 3. – С. 3–19.
- Флоренсов Н.А.** Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. – Л.: Изд. АН СССР. Ленинградское отделение, 1960. – 258 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.** Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). – Новосибирск: Наука, 1983. – 112 с.
- Lunina O.V., Denisenko I.F.** Single-event throws along the Delta Fault (Baikal rift) reconstructed from ground penetrating radar, geological and geomorphological data // Journal of Structural Geology. – 2020. – Vol. 141. – Article 104209, doi: 10.1016/j.jsg.2020.104209.

REFERENCES

- Bulmasov A.P.** Some features of geophysical fields and crustal structures in the Baikal region // Baikal Rift [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1960. – P. 113–123.
- Dashevskij Yu.A., Nevedrova N.N., Morozova G.M., Grekhov I.O., Potorochina N.G.** Strain sensitive objects in the geoelectric section of the Baikal prognostic range as an indicator of the preparation of seismic events // Geology and Geophysics. – 1999. – Vol.40 (3). – P. 409–421.
- Florensov N.A.** Mesozoic and Cenozoic Basins in the Baikal Region [in Russian]. – Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moscow–Leningrad, 1960. – 258 p.
- Golenetskiy S.I., Ruzhich V.V., Drennova G.F., Emeliyanova I.A.** Large earthquakes in the area of the Selenga River delta and a shock of July 13, 1993 // Volcanology and Seismology. – 1996. – Vol. 17 (4–5). – P. 611–620.
- Lunina O.V.** Faults of the Pliocene–Quaternary activation in the south of Eastern Siberia and their role in the development of seismically induced geological processes. DSci. Thesis [in Russian]. – Irkutsk, 2015.
- Lunina O.V., Denisenko I.F.** Single-event throws along the Delta Fault (Baikal rift) reconstructed from ground penetrating radar, geological and geomorphological data // Journal of Structural Geology. – 2020. – Vol. 141. – Article 104209, doi: 10.1016/j.jsg.2020.104209.
- Lunina O.V., Denisenko I.A., Gladkov A.A.** Particularities of vertical displacements along the Delta fault during the 1862 Tsagan earthquake on Lake Baikal // Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Nauki o Zemle. – 2021. – Vol. 37. – P. 70–86 doi: 10.26516/2073-3402.2021.37.70.
- Mats V.D., Yefimova I.M.** Geological history of Lake Baikal // Priroda. – 2017. – Vol. 3. – P. 13–27.
- Mandel'baum M.M., Epov M.I., Morozova G.I., Nevedrova N.N., Yeltsov I.N.** Seismic activity and dynamics of electrical conductivity of the earth's crust at the Baikal polygon // Geology and Geophysics. – 1996a. – Vol. 37 (6). – P. 88–94.
- Mandelbaum M.M., Dashevsky Yu.A., Morozova G.M., Nevedrova N.N., Grekhov I.O., Martynov A.A.** GIS technology in inversion of electrical soundings // Geofizika. – 1996b. – Vol. 1. – P. 29–37.
- Morozova G.M., Dashevskij Yu.A., Nevedrova N.N., Grekhov I.O.** Deep accumulation of electrical conductivity and displacement fields in the Earth's crust of the Baikal prognostic polygon // Geology and Geophysics. – 1999. – Vol. 40 (3). – P. 332–345.
- Nevedrova N.N.** Geoelectric structure and variations in electrical conductivity according to electromagnetic sounding data with controlled sources: on the example of Siberian regions. DSci. Thesis [in Russian]. – Novosibirsk, 2013.
- Parfeev A.V., San'kov V.A.** Stress State of the Earth's Crust and Geodynamics of the Southwestern Part of the Baikal Rift System [in Russian]. – Geo, Novosibirsk, 2006. – 149 p.
- Sarkisyan S.G.** Mesozoic and Tertiary Sediments of the Baikal and Trans-Baikal Regions and the Russian Far East [in Russian]. – Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, Moscow, 1958. – 337 p.
- Solonenko V.P.** Seismogeology and Detailed Seismic Zoning of the Baikal Region [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1981. – 169 p.
- Seismotectonics and Seismicity of the Rift System of the Baikal Region** [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1968. – 217 p.
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu.** Areas of Dynamic Influence of Faults (Simulation Results) [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1983. – 112 p.

Solonenko V.P. Seismotectonics and modern structural development of the Baikal Rift Zone // Bajkal Rift [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1968. – P. 57–71.

Ushakov S.A., Fedynskij V.V., Shabalin N.A. Geophysical data on the nature of rift zones // Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. 4. Geology. – 1972. – Vol. 3. – P. 3–19.

Zond Geophysical Software, <http://zond-geo.com/english/>.

Zorin Yu.A. Recent Structure and Isostasy of the Baikal Rift Zone and Adjacent Territory [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1971. – 168 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НЕВЕДРОВА Нина Николаевна – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: интерпретация данных наземной геоэлектрики, электромагнитный мониторинг.

САНЧАА Айдиса Михайловна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: интерпретация данных наземной геоэлектрики, трехмерное математическое моделирование.

ЩЕКАЕВА Елизавета Андреевна – студентка Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: интерпретация данных ВЭЗ.