ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(10):90-105

УДК 550.837.3 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ПОИСКА ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

А.М. Санчаа[1], А.Н. Фаге[1], О.В. Шемелина[2]

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

[2] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация: Современное состояние большинства поверхностных водных объектов в Новосибирской области не соответствует действующим экологическим и градостроительным требованиям, в связи с чем возрастает роль подземных источников питьевого и хозяйственного водоснабжения. При условии финансовых ограничений особенно остро встает вопрос о повышении эффективности изыскательских работ для строительства новых водозаборных скважин. Целью настоящих исследований является разработка методики поиска неглубоких водоносных горизонтов в восточных районах Новосибирской области с использованием метода электротомографии, включая численное математическое моделирование, в том числе трехмерное, для выбора оптимальных участков размещения водозаборных скважин. Геологическое и гидрогеологическое строение восточной части Новосибирской области изучено комплексными геологическими партиями в 50—60-х годах прошлого века и дополнено изысканиями 90-х и 2000-х лет. Эти данные легли в основу построения геологических разрезов и послужили базой для интерпретации геофизических данных. Для уточнения гидрохимических характеристик подземных вод на каждом участке отобраны пробы воды из действующих скважин. В результате выполненных исследований установлено, что на большей части площадей в восточных районах Новосибирской области метод электротомографии является эффективным. Трехмерное численное математическое моделирование позволяет учесть расположение объектов с контрастными значениями удельного электрического сопротивления и их влияние на получаемые данные. Такими объектами являются разломные и трещиноватые зоны в палеозойских отложениях, которые рассматриваются как перспективный источник для организации питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Подземные воды этих зон являются пресными, гидрокарбонатно-кальциевыми. Результаты исследований представлены в нескольких примерах.

Ключевые слова: Новосибирская область, электротомография, удельное электрическое сопротивление, математическое моделирование, водоносный горизонт, подземные воды.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 18-45-540011, базового проекта ИГМ СО РАН.

Для цитирования: *Санчаа А. М., Фаге А. Н., Шемелина О. В.* Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 90–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105.

© А.М. Санчаа, А.Н. Фаге, О.В. Шемелина. 2019.

Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region

A.M. Sanchaa[1], A.N. Fage[1], O.V. Shemelina[2]

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru
[2] Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

Abstract: The current condition of the most surface water bodies in the Novosibirsk Region falls short of the effective ecological standards and urban development requirements. For this reason, significance of the underground sources of drinking and domestic water supply grows. Given financial constraints, it is of specific concern to enhance efficiency of exploration in construction of new water supply wells. This study is aimed to develop a prospecting procedure for shallow aquifers in the eastern Novosibirsk Region using electrical tomography and mathematical modeling, including 3D, for selecting optimal sites for water supply wells. The geological and hydrogeological structure of the eastern Novosibirsk Region was studied by geological field parties in the 1950s–60s and amended in the 1990s and 2000s. These data are used for construction of geological sections and interpretation of geophysical surveys. For updating of hydrochemical characteristics of groundwater, water was sampled in each operating well. The implemented research shows that the method of electrical tomography is efficient in the most of the eastern districts in the Novosibirsk Region. Three-dimensional mathematical modeling specifies location of objects with contrast values of electrical resistance and their effect on the data collected. Such objects are faults and fractured zones in the Paleozoic deposits, which are considered as promising sources of drinking and domestic water supply. Groundwater in these zones is fresh and contains calcium hydrocarbonate. The research findings are illustrated by examples.

Key words: Novosibirsk Region, electrical tomography, specific electrical resistance, mathematical modeling, aquifer, groundwater.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and by the Novosibirsk Region Government, Project No. 18-45-540011, baseline project of the Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

For citation: Sanchaa A. M., Fage A. N., Shemelina O. V. Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(10):90-105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105.

Введение

Проблема нехватки воды стоит во многих регионах не только нашей страны, но и в мире. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации, в которых освещаются исследования в этой области [1—7]. Поверхностные источники воды все больше загрязняются и истощаются, в связи с чем роль подземных источников возрастает. Для Новосибирской области эта проблема также актуальна. Об этом упоминается в том числе и в ежегодных докладах о состоянии окружающей среды в НСО [8]. Известны гидрогеологические исследования, проводимые сотрудниками Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН (ИНГГ СО РАН) [9]. Темп бурения новых скважин в Новосибирской области в настоящее время достаточно низкий. При условии ограниченности финансов особенно остро вста-

ет вопрос о повышении эффективности изыскательских работ для строительства новых скважин.

Комплексные геолого-съемочные работы по восточной части Новосибирской области были широко развернуты в 50—60-х годах прошлого века. Изыскания связаны с именами Т.Ф. Васютинской, В.А. Кутолина, Д.В. Михайловского, А.М. Ралко, В.А. Иванова, Г.И. Максименко, И.М. Земсковой, С.В. Петриловского, П.С. Порхал, П.А. Лапшина и многих других. В 90-х годах А.А. Анцыревым (Геоэкоцентр) были проведены геолого-экологические исследования условий Новосибирского промышленного района с особым вниманием к гидрогеологии района. В 2000-х годах оценкой состояния подземных вод занимались Г.М. Колтунова и А.С. Иванов (ОАО Новосибирскгеология). Специалисты ОАО Новосибирскгеологии в своих работах отметили необходимость проведения дополнительных поисковых, опытных и геофизических работ.

Из всех наземных геофизических методов при разведке подземных вод чаще всего применяется электроразведка. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород зависит от поровой влаги (свободной и связанной) и определяется такими факторами, как пористость, трещиноватость, водонасыщенность, с увеличением которых сопротивление пород уменьшается. Именно это определяет выбор данного метода при поиске водоносных горизонтов [10—12].

Данная работа направлена на разработку методики поиска водоносных горизонтов для питьевого водоснабжения населенных пунктов в восточной части Новосибирской области методом электротомографии в сочетании с трехмерным математическим моделированием, которое позволяет уменьшить неоднозначность решения обратной задачи, верифицировать полученные результаты. Основной задачей исследования является сопоставление геологических данных с полученными геоэлектрическими разрезами. Дополнительно для подтверждения собранных литературных данных были отобраны пробы воды и проанализированы на общую минерализацию и основной анионно-катионный состав.

Выбор участков исследования (рис. 1, с. 97) обусловлен несколькими параметрами. Для отработки методики поиска вод были необходимы участки с действующим водозабором и возможностью провести электротомографические изыскания в непосредственной близости от скважины. То есть прежде всего для выполнения работ нужна была свободная площадка как минимум до 0,5 км в поперечнике. Зачастую существующая инфраструктура населенных пунктов препятствует возможности получить результаты измерений без наведенных помех. Также авторами учитывались: а) потребность местных административных органов управления в дополнительных исследованиях участков водозабора и б) возможное разнообразие геологического строения на глубину исследования — до 100 м. Таким образом, из пары десятков потенциальных участков исследований в восточной части НСО были выбраны шесть, как наиболее соответствующие всем вышеперечисленным критериям.

Геологическое строение и гидрогеологические условия

Геологическое строение

С геологической точки зрения восточная часть НСО относится к Алтае-Саянской складчатой области, в свою очередь представленной Колывань-Томской складчатой зоной и Салаиром, между которыми расположены структуры Горловского прогиба и Инского залива Кузбасса. Рассматриваемые в исследовании районы работ приурочены к Колывань-Томской складчатой зоне. В ее геологическом строении отчетливо выделяются

три основных комплекса: складчатый фундамент палеозойского возраста, перекрывающие его осадочные образования верхнепалеогенового, неогенового и четвертичного возраста и современный осадочный комплекс.

Наиболее древними породами фундамента являются среднедевонские отложения, представленные осадочными (песчаниками, глинистыми сланцами, конгломератами) или эффузивно-осадочными породами (долеритами, андезитами, туфопесчаниками, иногда метаморфизованными до хлоритовых и хлорит-серицитовых сланцев). Выше с несогласным залеганием распространены породы инской серии (D3—C1). Это комплекс осадков с постепенной сменой (снизу вверх) от глинистых сланцев и алевролитов с маломощными прослоями песчаников и известняков до песчаников мелко- и среднезернистых с прослоями глинистых сланцев. Породы часто трещиноватые. Абсолютная отметка кровли изменяется от 80 до 160 м без определенной закономерности.

В пределах исследуемых участков породы фундамента везде перекрыты осадочными образованиями. В позднем палеозое в результате тектонических процессов толща осадков была интенсивно дислоцирована и осложнена разрывными нарушениями. Общее простирание складок и крупных разрывных нарушений — северо-восточное, совпадающее с генеральным направлением Колывань-Томской складчатой зоны. Нередко эти структуры пересекаются разломами северо-западного или близкого к нему простирания (Салаирского). В узлах пересечения разноориентированных нарушений происходило внедрение интрузий гранитоидного состава. Более мелкие разрывы часто выполнены долеритовыми дайками. Верхнепалеозойские интрузии гранитоидов прослеживаются в долине р. Оби и относятся к Обскому массиву. В пределах рассматриваемых участков наиболее близко к дневной поверхности выходят Батурино-Бибеевский (участок 5) и Колыванский (участок 6) выступы массива. Глубина залегания кровли зафиксирована на отметках 8 и 16 м соответственно. Более поздние тектонические процессы привели к выравниванию рельефа и формированию коры выветривания. Состав коры выветривания наследует первичные породы и является глинистым. Мощность ее колеблется от 0 до 200 м.

Второй крупный комплекс отложений представлен осадками верхнепалеогенового (олигоцен), неогенового и четвертичного возраста. Эти отложения трансгрессивно перекрывают палеозойский комплекс и кору выветривания и представлены терригенными платформенными осадками песчано-глинистого состава. Отдельные свиты неогенового возраста имеют глинисто-алевролитовый состав. Это слабопроницаемые породы и их распространение определяет формирование водоупоров местного и регионального значения, мощностью от 3 до 21 м.

Третий крупный комплекс (современных осадочных отложений) развит по всей территории. Сложен преимущественно лессовидными суглинками, супесями, глинами краснодубровской (QIIkrd) и федосовской (QIIfd) свит верхнеплиоценового-среднечетвертичного возраста.

Гидрогеологические условия

Аналогично геологическому строению Саяно-Алтайская гидрогеологическая область делится на гидрогеологические подрайоны — Томь-Колыванскую и Салаирскую гидрогеологические зоны и Кузнецкий адартезианский бассейн.

Томь-Колыванская гидрогеологическая зона имеет двухъярусное строение. Верхний ярус охватывает гидрогеологический комплекс песчано-алевритовых и глинистых отложений преимущественно

кайнозойского возраста, в котором залегают порово-пластовые безнапорные или слабонапорные водоносные горизонты. Нижний ярус — это гидрогеологический комплекс в породах верхней, наиболее выветрелой части палеозойского фундамента. Этот комплекс включает также водоносные зоны трещиноватости терригенных, терригенно-карбонатных, вулканогенно-осадочных и интрузивных формаций. Подземные воды нижнего гидрогеологического комплекса напорные и слабо напорные. Нижний и верхний гидрогеологические комплексы зачастую гидравлически связаны между собой, местами разделены водоупорными горизонтами глин неогена.

Повсеместное распространение имеют лишь воды, приуроченные к зоне трещиноватости и коре выветривания. Эти же воды являются и практически единственным действующим и перспективным источником для организации питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Эта зона прослеживается широкой полосой северо-восточного направления. Водовмещающие породы — верхняя выветрелая и трещиноватая зона песчаников, глинистых сланцев, алевролитов, гранитоидов. Глубина залегания кровли этой зоны зависит от рельефа палеозойского фундамента и вскрывается на глубинах от 1,5 до 100—160 м. Мощность зоны интенсивной трещиноватости 40—50 м, ниже она постепенно затухает. Воды преимущественно напорные. Безнапорный характер воды имеют в местах выхода трещиноватой зоны на поверхность или отсутствия перекрывающего глинистого водоупора. Водообильность зоны неравномерна и, зачастую, незначительна. Это зависит от состава пород, степени и характера выветрелости и трещиноватости.

По химическому составу воды верхнего яруса Томь-Колыванской гидрогеологической зоны относятся к гидрокарбонатным магниево-кальциевым с минерализацией 0,2—0,5 г/л. Содержание железа, как правило, превышает ПДК (0,3 мг/л) и составляет обычно 0,4—3 мг/л. Подземные воды нижнего яруса — гидрокарбонатные магниево-кальциевые, с минерализацией до 0,5 г/л. Фоновые природные концентрации железа и марганца часто превышают ПДК. Содержание железа составляет 0,02—7,0 мг/л, марганца — от 0,01 до 1,6 мг/л (ПДК 0,1 мг/л).

Методика исследований

Исследование основано на интерпретации данных метода электротомографии. Это современное направление методов сопротивлений и вызванной поляризации. Преимущество данного метода состоит в высокой производительности, относительной простоте выполнения измерений, развитом программном обеспечении 2D и 3D интерпретации. Поэтому электротомография в общем экономична. Применяется для решения широкого круга задач [13, 14]. Анализ геологической информации по восточной части Новосибирской области, численное математическое моделирование и анализ чувствительности позволяет нам сделать вывод о применимости данного метода для решения задач выделения водоносных горизонтов в рассматриваемых геологических условиях в случаях, когда водоносные горизонты залегают на глубинах до 80—130 м.

Исследование этим методом проводится в несколько этапов. Заложение профилей исследования на основе имеющейся априорной информации: геологические разрезы, данные о рельефе дневной поверхности, а также расположении рукотворных объектов, препятствующих проведению исследования. Для построения разрезов использовались данные скважин, ближайших к рассматриваемому участку. Как правило, это скважины, пройденные при комплексных работах геологическими партиями в

1950—1980-х годах. Кроме того, в распоряжении авторов были паспорта действующих водозаборных скважин на участках исследования. Следует отметить, что зачастую геологическое описание, приведенное в паспорте, достаточно скудное и основывается на категориях пород по буримости. Выбор оптимальной конфигурации электроразведочной установки (шаг электроразведочной линии, схема исследования) осуществлялся при помощи численного моделирования.

Полевые работы проводились при помощи электроразведочной станции «Скала-48», разработанной в ИНГГ СО РАН, с установкой Шлюмберже, с шагом между электродами 5 или 10 м. На участках с глубоким залеганием (более 80 м) палеозойского фундамента измерения проводились дипольной установкой, поскольку она имеет большую глубинность. Выбор той или иной установки основан на результатах моделирования с учетом априорной геологической информации. Полученные данные проходят контроль качества и предварительную обработку непосредственно в полевых условиях. В зависимости от особенностей объекта и, соответственно, конфигурации исследования, выполняется двумерная или трехмерная инверсия полевых данных. Известно, что при наличии трехмерных неоднородностей в разрезе результаты двумерной инверсии могут быть искажены, что может привести к неправильной интерпретации, в связи с чем и проводят трехмерную инверсию.

Верификация полученных результатов и решение проблемы эквивалентности решения обратной задачи решались путем привлечения дополнительной информации и выполнением трехмерного математического моделирования. Особенно необходимо это при выделении разломных зон.

Программы, использованные для двумерной инверсии и моделирования данных — Res2Dinv (Geotomo software), Zond Res2D (Zond Software), для трехмерной инверсии и моделирования — Zond Res3D (Zond Software), ERTLab [15—17]. Также расчеты 3D моделирования проводились в программе, разработанной сотрудниками ИНГГ СО РАН [18].

Химический состав воды проанализирован на основной анионно-катионный состав (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}), а также замерены pH и общая минерализация. Содержание катионов было измерено атомно-абсорбционным методом на спектрометре Solar (Thermo Electron Corporation, USA). Содержание хлоридов и гидрокарбонатов проанализировано титриметрическими методами, сульфатов — турбидиметрическим методом.

Результаты исследований

Исследованные участки разделены на два типа в зависимости от пород, вмещающих основную водоносную зону. К первому типу относятся участки с водами в трещиноватых глинистых сланцах (участки 1, 2, 3, 4 (см. рис. 1, с. 97)), ко второму — участки с водами, приуроченными к зоне трещиноватости в гранитах (участки 5 и 6 (см. рис. 1)).

В статье приведем результаты исследования по трем участкам — 1, 2, 5. Некоторые сведения по результатам исследований отражены в публикациях [19—20].

Участок 1. По данным паспорта водозаборной скважины, расположенной непосредственно на участке (скв. Б на рис. 2, с. 98), геологический разрез представлен (сверху вниз) супесями и суглинками краснодубровской свиты Q2krd (от 0 до 23 м), трещиноватыми глинистыми сланцами, выветрелыми в верхней части (от 23 до 50 м) и девонскими плотными кристаллическими породами (50—65 м). Общая мощность выветрелых трещиноватых глинистых сланцев около

17 м. Уровень грунтовых вод находится на глубине 2 м. Вероятно, на участке присутствуют воды аллювиального четвертичного водоносного горизонта и воды трещиноватой зоны палеозойского фундамента. Поскольку водоупорных пород на участке не отмечено, воды свободно перемешиваются. По химическому составу воды (отобранные из действующей скважины) являются гидрокарбонатно-кальциевыми с величиной общей минерализации 0,45 г/л, с повышенными концентрациями железа (1,4 мг/л), что соответствует региональному фону.

На участке были выполнены измерения по трем параллельным профилям методом электротомографии установкой Шлюмберже с шагом между электродами 10 м. Геоэлектрический разрез по профилю 1, полученный в результате двумерной инверсии, проходящий через скважину, представлен на рис. 3 (с. 99).

Анализ геоэлектрических разрезов и геологических данных показывает, что самая верхняя часть — неоднородна, с УЭС 10—50 Ом · м (синяя и сине-зеленая цветовая гамма) представлена чередованием супесей и суглинков краснодубровской свиты Q2krd, ниже по разрезу отложения с УЭС 80—180 Ом · м представлены корой выветривания и трещиноватыми глинистыми сланцами, далее по разрезу породы с УЭС более 200 Ом · · м (оранжево-красные оттенки), соответствующие плотной кристаллической породе. Геоэлектрические разрезы получены при двумерной инверсии данных в программе Res2Dinv (Geotomo software). Далее была выполнена трехмерная инверсия в программе ERTlab, построена трехмерная геоэлектрическая модель.

Результат представлен на рис. 4 (с. 99) в виде куба сопротивлений, здесь же показана скв. Б. В верхней части разреза — чередование супесей и суглинков (с УЭС до 40 Ом · м) (синяя и сине-зеленая цветовая гамма), ниже по разрезу — кора выветривания, трещиноватые сланцы (с УЭС 45—55 Ом · м) (желто-оранжевые оттенки), далее — плотная кристаллическая порода (глинистые сланцы, долерит) (с УЭС более 65 Ом · м) (красные оттенки). Геоэлектрический разрез согласуется со скважинными данными. Профили измерений отмечены точечным пунктиром. К сожалению, водозаборные скважины зачастую размещены на территории поселка, поэтому не всегда удается проложить профили через необходимое расстояние. Программа позволяет увидеть разрез в любой точке, что позволяет выделить более перспективные участки на бурение скважин на основе анализа скважинных данных, УЭС отложений и глубины залегания палеозойского фундамента.

Участок 2. На исследуемом участке расположены две водозаборные скважины. Одна из них служит источником питьевой воды, другая построена для технических нужд поселка. По данным паспорта скважины с питьевой водой геологический разрез представлен (сверху вниз) суглинками и глинами с линзами песка (0—30 м) (QIII), выветрелыми сланцами (30—40 м) и сланцами трещиноватыми (40—100 м) (D2-C1). Авторы статьи не располагают данными по геологическому разрезу второй скважины. Кроме того, к сожалению, в рассмотренной литературе, в том числе фондовой, не нашлось информации о ранее пройденных скважинах и их разрезах вблизи участка, чтобы можно было с большей уверенностью говорить о детальном геологическом строении. Уровень грунтовых вод при бурении зафиксирован на глубине 32 м, т.е. водоносный горизонт приурочен к трещиноватой зоне и коре выветривания. По химическому составу воды (отобранные из действующей скважины) являются гидрокарбонатно-кальциевыми с величиной общей минерализации

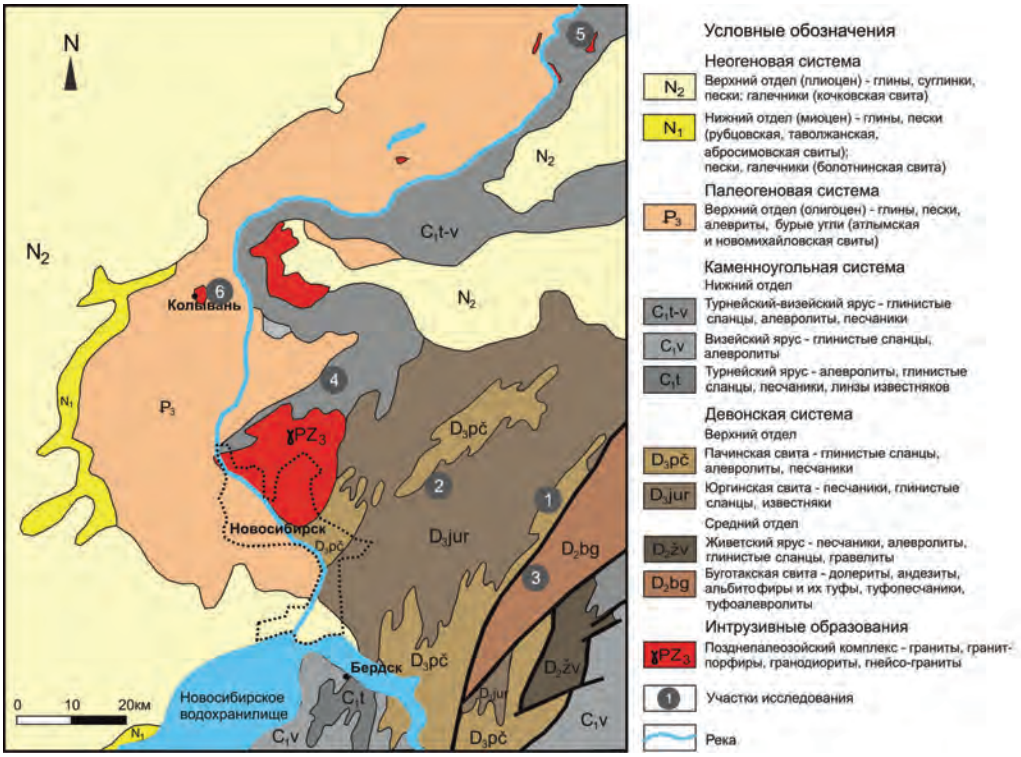

Рис. 1. Местонахождение участков работ (геологическая основа выполнена по А.А. Анцыреву)
Fig. 1. Location of study areas (geological base according to A.A. Antsyrev)

0,33 г/л (пресные). Повышенных содержаний железа в пробах воды не отмечено.

На этом участке выполнено три электротомографических профиля с установками поль-диполь с нагоняющими расстановками и установкой Шлюмберже. При измерениях поль-дипольной установкой шаг электроразведочной линии (расстояние между соседними электродами) — 5 м, линия «бесконечность» вынесена перпендикулярно профилю исследования на расстояние 1000, максимальная глубина исследования — 80 м. Первая скважина расположена между профилями 1 и 2, вторая — на профиле 3.

На рис. 5 (с. 100) представлен геоэлектрический разрез по профилю 1 (поль-дипольная установка). Здесь использовалась электроразведочная линия в конфигурации «одна полная расстановка и две нагоняющих» (длина электроразведочной линии в такой конфигурации — 465 м, общее число электродов — 96). Верхняя часть представлена в основном проводящими отложениями с УЭС от 5 до 100 Ом · м с неоднородностями в самой верхней части разреза с УЭС порядка 350 Ом · м, по скважинной информации соответствует глинам с линзами песка (QIII). Ниже разрез представлен высокоомными породами (> 500 Ом · м), предположительно глинистыми сланцами, глинистыми сланцами разрушенными (90—180 Ом · м) (D2-C1). На разрезе на абс. отм. менее 150 м хорошо выделяется блок с УЭС более 500 Ом · м, по скважинным данным соответствующие глинистым сланцам. Кроме того, на глубинах залегания глинистых сланцев на отметках от 230—300 до 400—500 по профилю выделяются

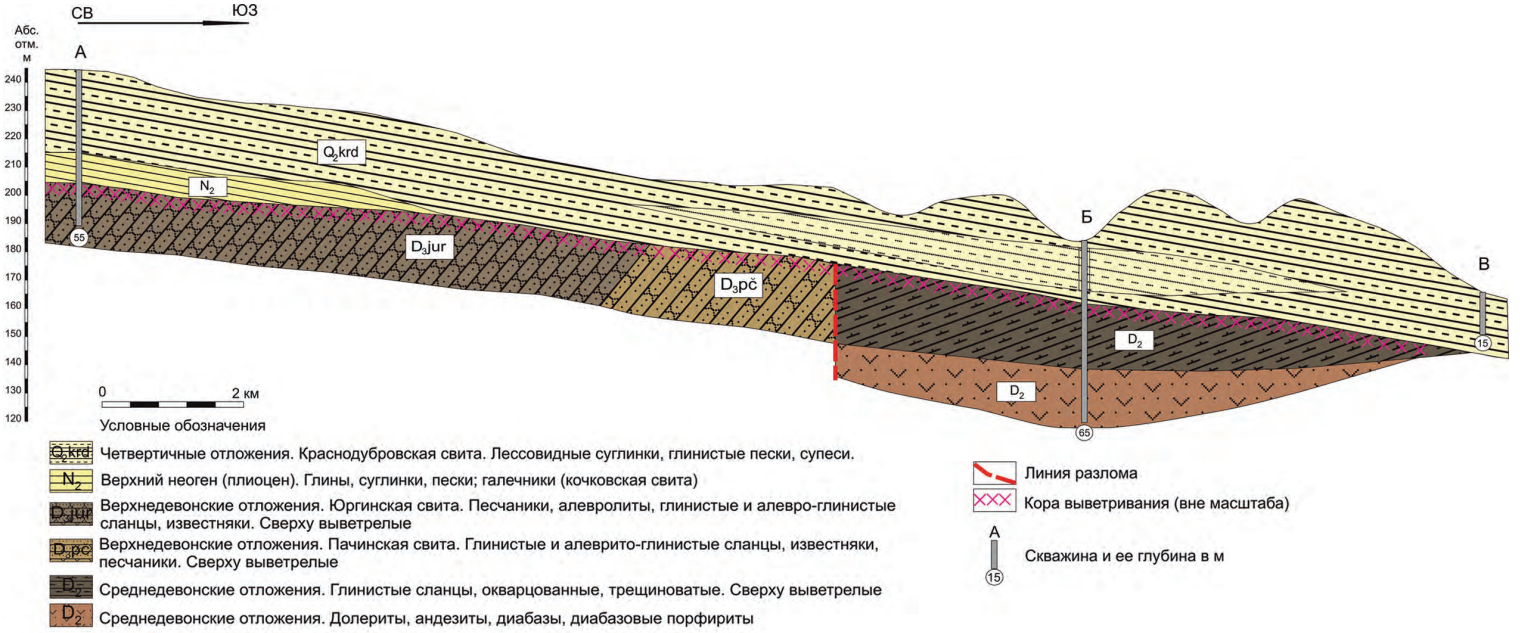

Рис. 2. Геологический разрез участка 1.
Fig. 2. Geological section of site 1

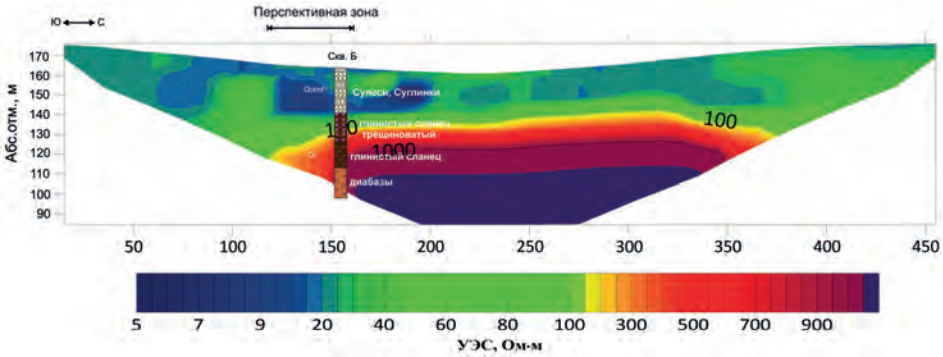

Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю 1 на участке 1
Fig. 3. Geoelectrical section of profile 1 on site 1

области с пониженным сопротивлением (90—180 Ом · м), связанные с разломными зонами. Именно эти области могут быть перспективными на воду. На двух других профилях отмечаются аналогичные особенности строения разреза.

Тектоническая схема рассматриваемого района предполагает наличие таких разломных зон непосредственно на участке. Значительные различия в масштабах обзорной карты и рассматриваемого участка не позволяют однозначно указать на расположение разлома. С целью подтверждения полученных результатов было выполнено трехмерное моделирование. Оно позволило верифицировать наличие разломной зоны, а также дало возможность определить наиболее перспективные варианты участков заложения скважин. Использовались данные, полученные с установкой Шлюмберже с расстоянием между электродами 5 м. За основу были взяты результаты двумерной и трехмерной инверсии данных электротомографии. Так разрез в основном представлен суглинками и супесями (среднее значение УЭС составляет 50 Ом·м), а также гли-

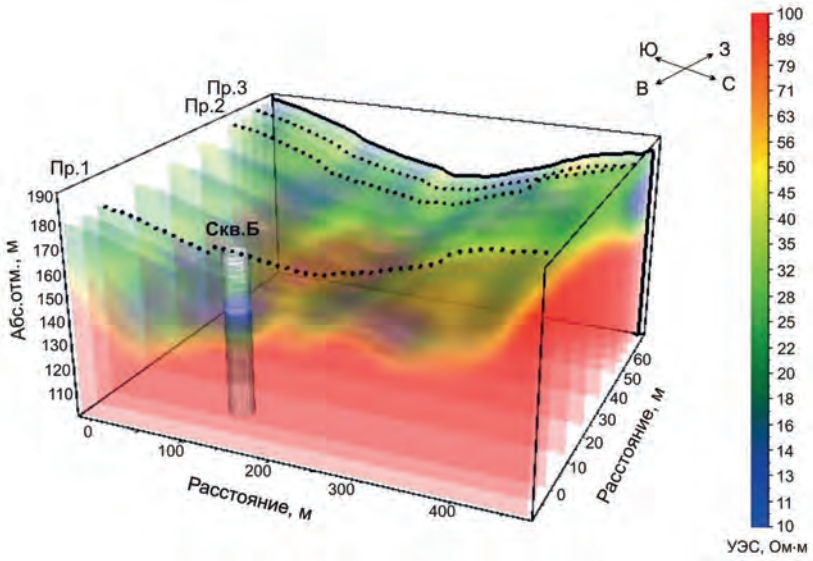

Рис. 4. 3Д инверсия полевых данных
Fig. 4. 3D inversion of field data

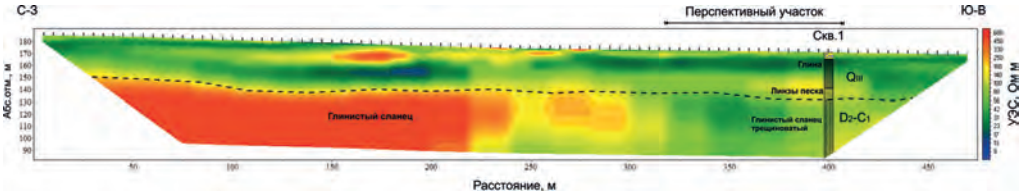

Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю 1 на участке 2
Fig. 5. Geoelectrical section of profile 1 of site 2

нистыми сланцами различной степени разрушенности (значения УЭС порядка 2000 Ом · м). Для разломной зоны значение УЭС было принято 100 Ом · м, поскольку предполагалось, что породы обводнены. На рис. 6 хорошо видно, что общая конфигурация распределения УЭС на разрезах по модельным и полевым данным коррелируется достаточно хорошо. Наибольший интерес вызывает пра-

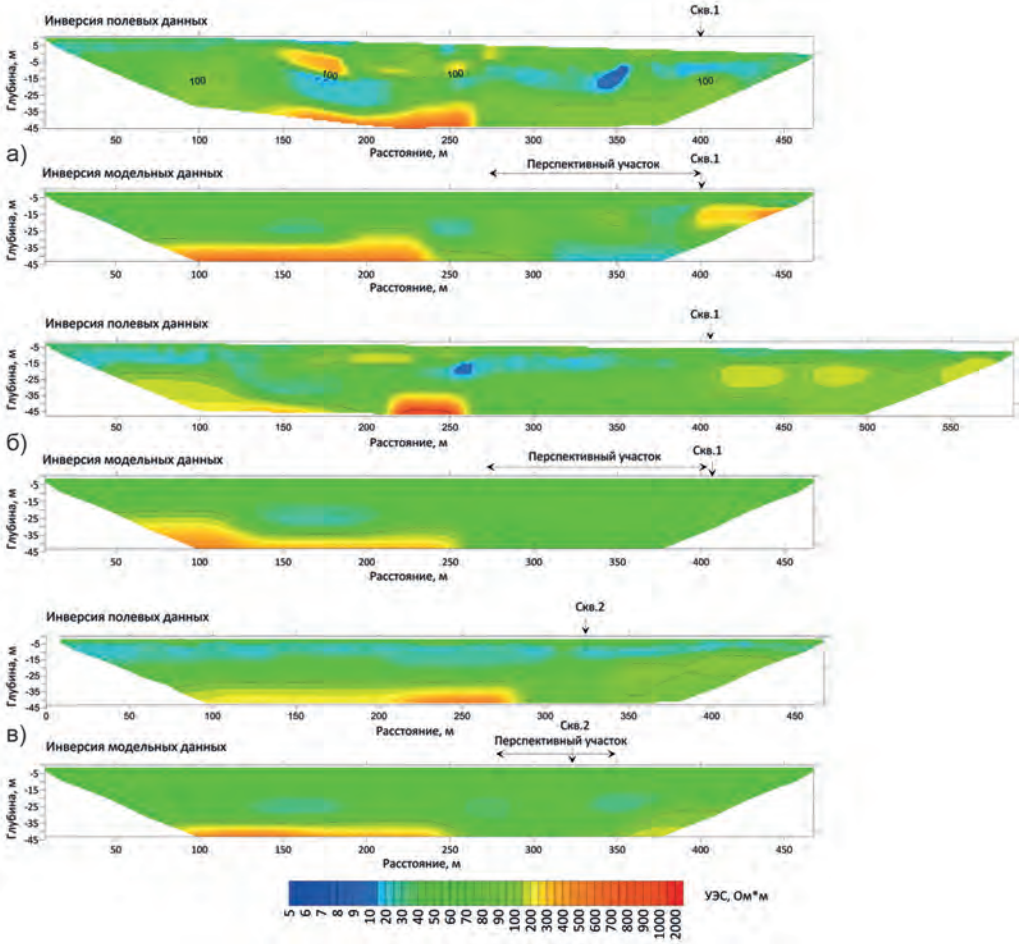

Рис. 6. Результаты инверсии полевых данных и данных трехмерного численного моделирования (модельных): профиль 1 (а); профиль 2 (б); профиль 3 (в)
Fig. 6. Inversion of field data and 3D modelling calculated data: profile 1 (a); profile 2 (b); profile 3 (v)

вая часть разреза (с глубин 35—40 м, отметок 270—300 м и до 400 м по профилю) — зона ослабленных, а также рыхлых пород, приуроченная к зоне тектонического разлома (с УЭС (20—90 Ом · м). Эта зона наиболее перспективна с точки зрения водоносности.

Участок 5. По данным паспорта скважины, пробуренной в 2013 г. на участке работ геологический разрез до вскрытой глубины 70 м представлен двумя основными разностями пород. Верхняя часть разреза до глубины 5,6 м представлена четвертичными глинами и песками (QII). Ниже залегают палеозойские граниты (PZ3) разной степени выветрелости и трещиноватости. С глубины 57 м и до забоя скважины (70 м) граниты отмечены как крепкие трещиноватые (рис. 7). Статический уровень грунтовых вод на момент бурения составил 4,4 м. По химическому составу воды (отобранные из действующей скважины) являются гидрокарбонатно-кальциево-магниевыми с величиной общей минерализации 0,34 г/л (пресные) с повышенными концентрациями железа (0,53—0,86 мг/л). Водоносный горизонт, вскрытый скважиной, представляет собой воды аллювиальных четвертичных террас рек Ояш и Обь, взаимосвязанных с водами трещиноватых палеозойских пород. Режим вод, с высокой долей вероятности, связан с режимом Оби.

Измерения по трем профилям были выполнены установками поль-диполь. Шаг электроразведочной линии (расстояние между соседними электродами) — 5 м, линия «бесконечность» вынесена перпендикулярно профилю на расстояние 1000 м, максимальная глубина исследования — 80 м, число электродов электроразведочной линии — 48, на каждом профиле использовалась одна электроразведочная линия (без нагоняющей) длиной 235 м. Скважина находится ближе к центру профиля 2 (отм. 86 м по профилю).

На рис. 8 представлен геоэлектрический разрез по профилю 2, проходящий через скважину. Геоэлектрические разрезы расположены перпендикулярно линии геологического разреза. С учетом скважинной информации верхняя часть представлена тонким проводящим слоем (мощностью до 10 м), соответству-

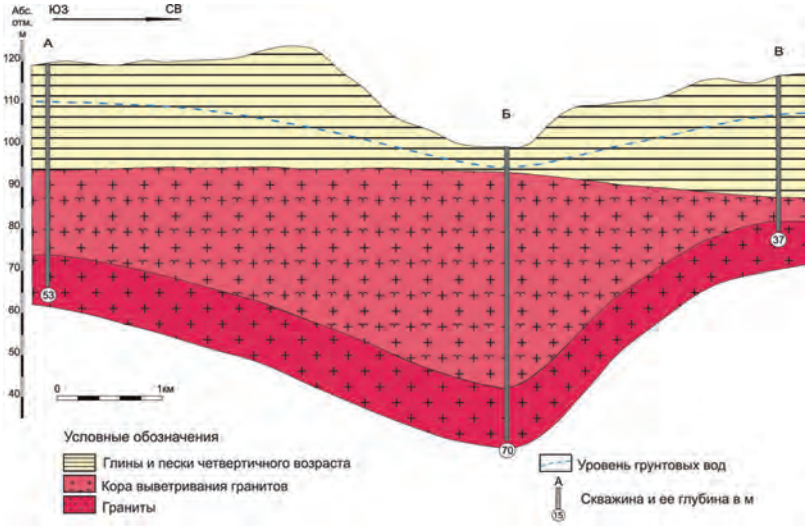

Рис. 7. Геологический разрез участка 5
Fig. 7. Geological section of the site 5

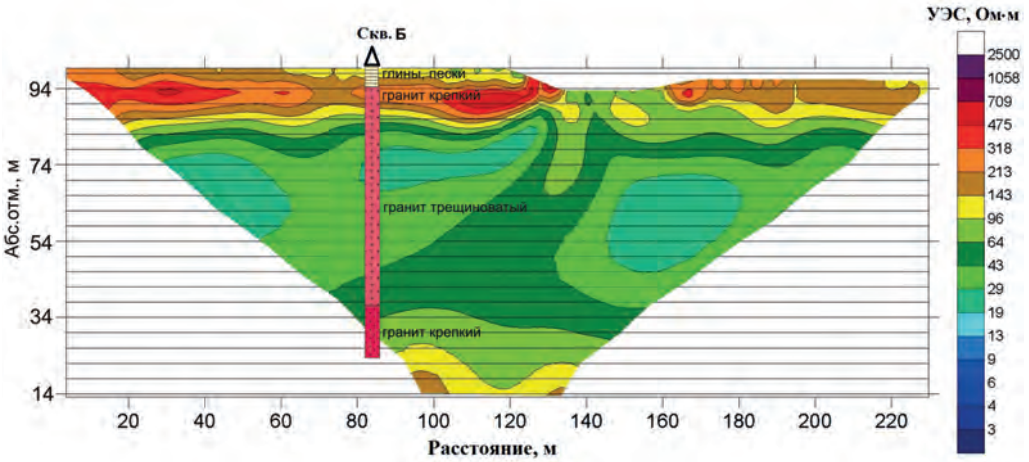

Рис. 8. Геоэлектрический разрез по профилю 2 на участке 5
Fig. 8. Geoelectrical section of profile 2 on the site 5

ющим четвертичным глинам и пескам (QII), ниже по разрезу — отложения, представленные чередованием крепкого (более 300 Ом · м) и слабого (трещиноватого) гранита с УЭС 90—300 Ом · м (PZ3). В трещиноватых гранитах области с меньшими УЭС, возможно, за счет обводненности гранитов.

Разрезы по двум другим профилям в целом отражают аналогичное строение — неглубокое залегание гранитного массива (10 м) и чередование гранита разной степени трещиноватости, отражающееся в изменениях значений УЭС. Анализ геоэлектрических разрезов позволяет сделать вывод о том, что, по площади распространения зон трещиноватости гранитов — неравномерное, как по глубине, так и по латерали. Данные электротомографии дают возможность выделения более водонасыщенных и неводонасыщенных областей. С глубин 40—80 м гранит — крепкий и имеет смысл закладывать скважины до этих глубин.

Заключение

Восточная часть НСО характеризуется трехъярусным геологическим строением и наличием нескольких водоносных горизонтов, гидравлически связанных между собой. Наибольшее распространение получили воды трещиноватой зоны палеозойских пород. Эта зона является и наиболее перспективной с точки зрения поисков качественных питьевых вод. Как правило, эти воды по химическому составу пресные гидрокарбонатно-кальциевые, с высоким содержанием железа (0,07—1,4 мг/л). Таким образом, основной задачей при поиске участков с высоким дебитом является уточнение его геологического строения: глубина залегания кровли палеозойского фундамента, мощность трещиноватой зоны, наличие и мощность коры выветривания, а также наличие водоупоров и разломных зон.

Для восточной части Новосибирской области актуальность применения метода электротомографии вытекает из особенностей геологического строения водоносных горизонтов, при изучении которых особенно востребована высокая детализация разрезов и хорошая разрешающая способность. Электротомография зарекомендовала себя как надежный инструмент при решении поставленных задач. С помощью электротомографии удается обнаруживать зоны тектонических нарушений и приуроченных к ним участков повышенной трещиноватости

(обводненности), отражающиеся в пониженных значениях УЭС. После выделения разломных зон для уточнения и обоснования геоэлектрических моделей следует выполнять численное трехмерное математическое моделирование, которое дает возможность учесть влияние на измеренные данные контрастных по УЭС областей, верифицировать полученные данные и уточнить положение разломов, тем самым определить оптимальные участи и глубины для заложения неглубоких водозаборных скважин, как на новых участках, так и на существующих водозаборах, но где требуется перебуривание в связи с их неудовлетворительным техническим состоянием. Таким образом, применение электротомографии на стадии эксплуатационной разведки подземных вод может быть весьма эффективна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Akpan Anthony E., Ebong Ebong D., Ekwok Stephen E.* Assessment of the state of soils, shallow sediments and groundwater salinity in Abi, Cross River State, Nigeria. Environmental Earth Sciences, 2015, Vol. 73, pp. 8547—8563, https://doi.org/10.1007/s12665-015-4014-6.

2. *Daesslé L.W., Pérez-Flores M.A., Serrano-Ortiz J., Mendoza-Espinosa L., Manjarrez-Masuda E., Lugo-Ibarra K.C., Gómez-Trevinõ E.* A geochemical and 3D-geometry geophysical survey to assess artificial groundwater recharge potential in the Pacific coast of Baja California, Mexico // Environmental Earth Sciences, 2014, Vol. 71, pp. 3477—3490, https://doi.org/10.1007/s12665-013-2737-9.

3. *Fadili A., Mehdi K., Riss J., Najib S., Makan A., Boutayab K.* Evaluation of groundwater mineralization processes and seawater intrusion extension in the coastal aquifer of Oualidia, Morocco: hydrochemical and geophysical approach // Arabian Journal of Geosciences, 2015, Vol. 8, pp. 8567—8582, https://doi.org/10.1007/s12517-015-1808-5.

4. *Metwaly M., El-Qady G., Massoud U., El-Kenawy A., Matsushima J., Al-Arifi N*. Integrated geoelectrical survey for groundwater and shallow subsurface evaluation: case study at Siliyin spring, El-Fayoum, Egypt // International Journal of Earth Sciences (GR Geologische Rundschau), 2010, Vol. 99, pp. 1427—1436, https://doi.org/10.1007/s00531-009-0458-9.

5. *Kanta A., Soupios P., Barsukov P., Kouli M., Vallianatos F.* Aquifer characterization using shallow geophysics in the Keritis Basin of Western Crete, Greece // Environ Earth Sci, 2013, 70, pp. 2153—2165. DOI 10.1007/s12665—013—2503-z.

6. *Sonkamble S., Chanfra S., Somvanshi V.K., Ahmed S.* Hydro-geophysical techniques for safe exploitation of the fresh groundwater resources in coastal area // Environ Earth Sci, 2016, 75, pp. 279. DOI 10.1007/s12665-015-5210-0.

7. *Zouhri L., Carlier E., Kabbour B.B., Toto E.A., Gorini C., Louche B.* Groundwater interaction in the coastal environment: hydrochemical, electrical and seismic approaches // Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008, Vol. 67, pp. 123—128, https://doi.org/10.1007/s10064-007-0101-6.

8. *Правительство* Новосибирской области: [сайт]. URL: https://www.nso.ru/page/2624).

9. *Сухорукова А.Ф.*, *Новиков Д.А.* Гидрогеология Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (г. Новосибирск) / Подземные воды Востока России. Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием). — Новосибирск, 2018. — С. 473—480.

10. *Давыдов В.А.* Электроразведочные технологии при поисках подземных вод в скальных породах // Инженерные изыскания. — 2015. — № 2. — С. 58—64.

11. *Саламов А.М.* Обобщенный анализ результатов поиска подземных пресных вод для водоснабжения населенных пунктов комплексными геофизическими методами // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. — 2016. — 44(63), ч. 1. — С. 111—118.

12. *Martorana R., Fiandaca G., Ponsati A.C., Cosentino P.L.* Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysic // IOP Publishing Journal of Geophysics and Engineering, 2009, Vol. 6, pp. 1—20, https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001.

13. *Павлова А.М.*, *Шевнин В.А.* 3D-электротомография при исследовании ледниковых отложений // Геофизика. — 2016. — № 6. — С. 32—37.

14. *Куликов В.А.*, *Бобачев А.А.*, *Модин И.Н.*, *Паленов А.Ю.*, *Стерлигова И.Д.* Исследование неогеновой палеодолины на территории национального парка Угра // Вестник Московского университета. Геология. — 2014. — № 3. — С. 54—60.

15. *Loke M.H.* Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. 1996—2002, [сайт]. URL: http://www.geotomosoft.com, 2019.

16. *Kaminskii A.E.* Zond Software: [сайт]. URL: http://www.zond-geo.com.

17. *ERTlab* 3d electrical resistivity tomography software, available at: http://ertlab64.com/.

18. *Сурodина И.В.*, *Фаге А.Н.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660273, 20.09.2017. Модуль численного моделирования данных метода электротомографии на графических процессорах.

19. *Фаге А.Н.*, *Санчаа А.М.*, *Шемелина О.В.* Трехмерное численное моделирование рельефа кристаллического фундамента при решении гидрогеологических задач методом электротомографии в с. Михайловка Искитимского района Новосибирской области / Марчуковские научные чтения–2018 «Вычислительная математика и математическая геофизика». Материалы международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения акад. А.С. Алексеева. — Новосибирск, 2018. — С. 108. URL: http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/march-2018—108.pdf?action=download

20. *Faguet A., Sanchaa A.* Electrical resistivity tomography and 3D numerical modeling for aquifer mapping in Novosibirsk region / Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics: VII International Scientific Conference of young scientists and students, Baku, 2018, pp. 81—82, URL: http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/itsm-2018-81.pdf?action=download . ГИАБ

REFERENCES

1. Akpan Anthony E., Ebong Ebong D., Ekwok Stephen E. Assessment of the state of soils, shallow sediments and groundwater salinity in Abi, Cross River State, Nigeria. Environmental Earth Sciences, 2015, Vol. 73, pp. 8547—8563, https://doi.org/10.1007/s12665-015-4014-6.

2. Daesslé L.W., Pérez-Flores M.A., Serrano-Ortiz J., Mendoza-Espinosa L., Manjarrez-Masuda E., Lugo-Ibarra K.C., Gómez-Trevinõ E. A geochemical and 3D-geometry geophysical survey to assess artificial groundwater recharge potential in the Pacific coast of Baja California, Mexico // Environmental Earth Sciences, 2014, Vol. 71, pp. 3477—3490, https://doi.org/10.1007/s12665-013-2737-9.

3. Fadili A., Mehdi K., Riss J., Najib S., Makan A., Boutayab K. Evaluation of groundwater mineralization processes and seawater intrusion extension in the coastal aquifer of Oualidia, Morocco: hydrochemical and geophysical approach // Arabian Journal of Geosciences, 2015, Vol. 8, pp. 8567—8582, https://doi.org/10.1007/s12517-015-1808-5.

4. Metwaly M., El-Qady G., Massoud U., El-Kenawy A., Matsushima J., Al-Arifi N. Integrated geoelectrical survey for groundwater and shallow subsurface evaluation: case study at Siliyin spring, El-Fayoum, Egypt // International Journal of Earth Sciences (GR Geologische Rundschau), 2010, Vol. 99, pp. 1427—1436, https://doi.org/10.1007/s00531-009-0458-9.

5. Kanta A., Soupios P., Barsukov P., Kouli M., Vallianatos F. Aquifer characterization using shallow geophysics in the Keritis Basin of Western Crete, Greece // Environ Earth Sci, 2013, 70, pp. 2153—2165. DOI 10.1007/s12665—013—2503-z.

6. Sonkamble S., Chanfra S., Somvanshi V.K., Ahmed S. Hydro-geophysical techniques for safe exploitation of the fresh groundwater resources in coastal area // Environ Earth Sci, 2016, 75, pp. 279. DOI 10.1007/s12665-015-5210-0.

7. Zouhri L., Carlier E., Kabbour B.B., Toto E.A., Gorini C., Louche B. Groundwater interaction in the coastal environment: hydrochemical, electrical and seismic approaches // Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008, Vol. 67, pp. 123—128, https://doi.org/10.1007/s10064-007-0101-6.

8. The government of the Novosibirsk region: URL: https://www.nso.ru/page/2624).

9. Sukhorukova A.F., Novikov D.A. Hydrogeology of Zaeltsovsko-Moshchishenskiy occurrence of radon water (Novosibirsk). *Podzemnye vody Vostoka Rossii. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XXII Soveshchanie po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka s mezhdunarodnym uchastiem)*. Novosibirsk, 2018, pp. 473—480. [In Russ].

10. Davydov V.A. Electrical exploration technologies in the search for groundwater in rocks. *Inzhenernye izyskaniya*. 2015, no 2, pp. 58—64. [In Russ].
11. Salamov A.M. The generalized analysis of results of search of underground fresh water for water supply of settlements by complex geophysical methods. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2016. 44(63), part 1, pp. 111—118. [In Russ].
12. Martorana R., Fiandaca G., Ponsati A.C., Cosentino P.L. Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysic. *IOP Publishing Journal of Geophysics and Engineering*, 2009, Vol. 6, pp. 1—20, https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001.
13. Pavlova A.M., Shevnin V.A. 3D electrical resistivity tomography in the study of glacial sediments. *Geofizika*. 2016, no 6, pp. 32—37. [In Russ].
14. Kulikov V.A., Bobachev A.A., Modin I.N., Palenov A.Yu., Sterligova I.D. The study of Neogene pleodorina in the national Park Ugra. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geologiya*. 2014, no 3, pp. 54—60. [In Russ].
15. Loke M.H. *Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys*. 1996—2002, [сайт]. URL: http://www.geotomosoft.com, 2019.
16. Kaminskii A.E. *Zond Software*: URL: http://www.zond-geo.com.
17. *ERTlab 3d electrical resistivity tomography software*, available at: http://ertlab64.com/.
18. Surodina I.V., Fage A.N. Certificate of state registration of the soft No 2017660273, 20.09.2017.
19. Fage A.N., Sanchaa A.M., Shemelina O.V. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie rel'efa kristallicheskogo fundamenta pri reshenii gidrogeologicheskikh zadach metodom elektrotomografii v s. Mikhailovka Iskitimskogo raiona Novosibirskoi oblasti. *Marchukovskie nauchnye chteniya–2018 «Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya geofizika». Materialy mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya akad. A.S. Alekseeva*. Novosibirsk, 2018, pp. 108. URL: http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/march-2018—108.pdf?action=download.
20. Faguet A., Sanchaa A. Electrical resistivity tomography and 3D numerical modeling for aquifer mapping in Novosibirsk region. *Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics: VII International Scientific Conference of young scientists and students*, Baku, 2018, pp. 81—82, URL: http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/itsm-2018-81.pdf?action=download .

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Санчаа Айдиса Михайловна[1] — канд. геол.-минерал. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru,
Фаге Алексей Николаевич[1] — научный сотрудник,
Шемелина Ольга Владимировна — научный сотрудник, e-mail: Shem@igm.nsc.ru,
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН,
[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения РАН. Новосибирск, 630090, Россия.
Для контактов: Санчаа А.М., e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.M. Sanchaa[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Leading Researcher,
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru,
A.N. Fage[1], Researcher,
O.V. Shemelina, Researcher, e-mail: Shem@igm.nsc.ru,
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of Siberian Branch
of Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Russia,
[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics
of Siberian Branch of Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Russia.
Corresponding author: A.M. Sanchaa, e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru.