

ISSN 2541-8912 (Print)
ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН

GEOSYSTEMS
of Transition Zones

2023 **Том 7** **№ 1**

Уважаемые авторы, рецензенты и все друзья нашего журнала!

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон» благодарят всех, кто содействует журналу в выполнении его миссии – предоставление российским и зарубежным исследователям в области геологии, вулканологии, геофизики, сейсмологии, океанологии, географии, геомеханики, геоэкологии и др. возможности публиковать свои результаты изучения процессов и закономерностей переходных зон Земли.

При вашем заинтересованном участии журнал за шесть лет существования добился заметных успехов. Наблюдаются явные тренды роста основных параметров, по которым обычно оцениваются журналы. Например, повышение импакт-фактора РИНЦ как с учетом цитирования из всех источников, так и по цитированию в журналах ядра РИНЦ; рост числа ссылок в списках литературы в статьях; увеличение цитирования журналов и зарубежных источников и т.д. Это может способствовать повышению привлекательности и авторитета журнала.

Среди наших авторов ученые из Москвы, Петербурга, Екатеринбурга, Иркутска, Новосибирска, Владивостока, Хабаровска, Петропавловска-Камчатского, Южно-Сахалинска и других городов России.

В настоящее время журнал включен в Перечень ВАК по 9 специальностям в соответствии с новой Номенклатурой специальностей.

В конце 2022 г., как известно, ВАК провел оценку по качественным и количественным критериям журналов, входящих в Перечень. Все журналы распределены по коэффициенту научной значимости по категориям К1, К2, К3. Журналы, входящие в базы WoS, Scopus или RSCI, по умолчанию отнесены к К1. Наш журнал вошел во второй квартиль (К2).

Редколлегией принят тип рецензирования двойной слепой – наиболее оптимальный и рекомендуемый для журналов, нацеленных на вхождение в международные научные базы данных. Рецензии у нас в подавляющем большинстве высококвалифицированные. Мы благодарны нашим рецензентам и внутренним, и независимым, за доброжелательную и конструктивную критику, искреннюю заинтересованность в улучшении качества статей.

Журнал придерживается политики открытого доступа. С 2021 г. журнал включен в международную базу научных журналов Directory of Open Access Journals (DOAJ). PDF-файлы с полнотекстовыми версиями материалов, опубликованных в журнале, находятся в открытом доступе на сайте журнала и на сайте eLibrary, с 2022 г. сведения о статьях и ссылки на них размещаются на портале Российских научных журналов. Метаданные научных статей передаются в международные базы DOAJ и CrossRef.

Оформление журнала и сайт соответствуют всем формальным критериям отбора журналов в международные базы данных.

Стратегия развития журнала, по замыслу редколлегии, предполагала его вхождение в МНБД Scopus и/или Web of Sciences. Но известные реалии жизни сделали такое продвижение проблематичным. Как и другие журналы, мы столкнулись с немалыми трудностями. Основная из них состоит в сокращении притока статей и сужении географии авторов.

Редакция надеется, что журналу удастся сохранить контингент надежных авторов, которые привлекут к сотрудничеству коллег и аспирантов и помогут журналу преодолеть препятствия на пути продвижения его в Russian Science Citation Index (RSCI) (составную часть ядра РИНЦ).

Редакция журнала «Геосистемы переходных зон»

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.837.3;550.8.014;504.064.3

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.1.075-085>
<https://www.elibrary.ru/gytyub>

Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами

Т. А. Мингалева*¹, С. В. Шакуро², Н. П. Сенчина¹, А. С. Егоров¹

*E-mail: tatiana.mingaleva@bk.ru

¹Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «ФРОНТ Геология», Нижний Новгород, Россия

Резюме. На загрязненных нефтепродуктами участках сведения о геологическом строении, а также о степени загрязнения и геометрических параметрах поллютанта необходимы для оценки рисков, планирования работ по извлечению нефтепродуктов и рекультивации территории. Для решения подобных задач активно используются геофизические методы. В работе рассматривается участок с загрязненными нефтепродуктами грунтами, расположенный на берегу р. Волга. Целью работ является оконтуривание площади распространения нефтепродуктов. Для достижения поставленной цели выполнен комплекс методов малоглубинной геофизики (электроразведка, сейсморазведка) и газогеохимия. В качестве одного из способов интерпретации данных продемонстрированы результаты нового подхода к характеристике загрязненных участков путем RGB-синтеза данных. Способ основан на обобщении имеющихся материалов путем оптического смешивания данных трех пространственно распределенных характеристик, представленных в виде трех каналов – красный, зеленый, синий – с целью локализации линз гравитационно-подвижных и иммобилизованных нефтепродуктов. По результатам качественной интерпретации геофизической информации авторами построена схема с предполагаемым контуром распространения нефтепродуктов на изучаемой территории. Предложенный метод может использоваться для задач оконтуривания разливов нефтепродуктов при достаточном количестве информации, полученной геофизическим или другими методами (не менее 3), на этапе определения площади распространения загрязнения для участков. Этот подход может ускорить процесс интерпретации, так как такое наложение карт задает цветовым распределением различные петрофизические характеристики грунтов для выбранного глубинного уровня, а также облегчает задачу определения координат при соотнесении различных аномалий, выявленных разными методами.

Ключевые слова: RGB-синтез, малоглубинная геофизика, нефтепродукты, многопризнаковая классификация, комплексная интерпретация

Application of RGB-synthesis for complex interpretation of geophysical data in the study of areas contaminated by oil products

Tatiana A. Mingaleva*¹, Sergey V. Shakuro², Natalia P. Senchina¹, Alexey S. Egorov¹

*E-mail: tatiana.mingaleva@bk.ru

¹Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

²FRONT Geology LLC, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The information on geological structure as well as on the degree of contamination and geometrical parameters of a pollutant in oil-contaminated areas is necessary for risk assessment, planning of oil products recovery and territory remediation. Geophysical methods are actively used for solving such problems. The work considers the site on the Volga River bank, where soils are contaminated with petroleum products. The aim of the work is to delineate the distribution area of petroleum products. In order to achieve the goal, the set of near-surface geophysical methods (vertical electric sounding, seismic survey) and gas geochemistry were implemented. The results of a new approach to characterization of contaminated sites by RGB-data synthesis have been demonstrated as one of the ways of data interpretation. The method is based on the generalization of the available materials by optically mixing of the data of three spatially

distributed characteristics presented in the form of three channels – red, green, and blue – for the purpose of localizing the lenses of gravity-mobile and immobilized oil products. According to the results of the qualitative interpretation of geophysical information, the authors have built a scheme with the proposed contour of oil products distribution in the studied territory. The proposed method can be used for the delineation of oil spills along with the sufficient information obtained by geophysical or other methods (at least three) at the stage of determining the spread of contamination for the sites. This approach can speed up the interpretation process, as such maps overlaying sets the color distribution of different petrophysical characteristics of the soils for the selected depth level, and also eases the task of determination of coordinates when correlating various anomalies, identified by different methods.

Keywords: RGB-synthesis, near-surface geophysics, oil products, multi-attribute classification, complex interpretation

Для цитирования: Мингалева Т.А., Шакуро С.В., Сенчина Н.П., Егоров А.С. Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязненных нефтепродуктами. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 1, с. 75–85. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.075-085>. <https://www.elibrary.ru/gytyub>

For citation: Mingaleva T.A., Shakuro S.V., Senchina N.P., Egorov A.S. Application of RGB-synthesis for complex interpretation of geophysical data in the study of areas contaminated by oil products. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 75–85. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.1.075-085>. <https://www.elibrary.ru/gytyub>

Благодарности

Авторы благодарны уважаемым рецензентам за конструктивные замечания, способствующие улучшению данной публикации.

Acknowledgments

Authors would like to thank the respected Reviewers for the constructive comments that contribute to improving this publication.

Введение

Геофизические методы, в качестве косвенных методов, являются эффективным способом экспресс-оценки загрязненных территорий. Они играют большую роль при решении экологических задач – таких как, например, определение геометрических параметров зон разлива нефтепродуктов. Можно выделить ряд преимуществ косвенных методов, среди которых объемное изучение строения геологического объекта, дешевизна по сравнению с использованием прямых методов (бурения и геохимии).

Грунты, загрязненные в ходе транспортировки или хранения нефтепродуктов, приобретают сложное распределение физических свойств, которые варьируют не только вследствие изменения литологического состава и степени загрязненности, но и под воздействием различных последующих процессов – таких как, например, химическое выветривание. В большинстве случаев изменения связывают с биохимической деятельностью микроорганизмов, в результате чего меняется текстура грунтов и химический состав флюида [1–4]. Особенно актуальна данная тема для территорий нефтебаз, где углеводородные загрязнения существуют длительное время. Здесь грунты и нефтепродукты успели изменить свои свойства в ходе трансформационных изменений, что также будет влиять на результаты геофизических/геохимических исследований.

В большинстве случаев затруднительно выделить конкретную литологическую разность при рассмотрении только одного физического свойства или связанных с ним геофизических данных. Надежно идентифицировать различные группы грунтов возможно в результате анализа распределения нескольких физических признаков. Комплексный интегральный подход к построению моделей имеет существенные преимущества при решении многих исследовательских задач [5]. Существует достаточно много методик комплексной интерпретации данных: от простого визуального анализа различных карт, построенных для одной площади, до алгоритмов совместной инверсии. Каждый специалист решает сам, какой из методов ему лучше использовать при интерпретации.

При решении задач поиска и оконтуривания нефтепродуктов в грунтах обычно требуется информация по многим показателям для понимания гидрогеологической ситуации района, литологического расчленения грунтов и т.п. Для ускорения процесса интерпретации авторами предлагается подход, основанный на синтезировании изображений трех параметров на одной схеме. Цель работы – базируясь на результатах полевых геофизических исследований, оценить возможности совместного анализа данных малоглубинной геофизики посредством их RGB-синтеза для площадного оконтуривания загрязненных нефтепродуктами участков в грунтах на исследуемой территории. Задачами исследования являются: получение

полевых материалов в результате выполнения геофизических работ (электроразведки и сейсморазведки) и газогеохимии; изучение моделей миграции нефтепродуктов в грунтах и физических характеристик таких грунтов; ознакомление с возможными вариантами комплексной интерпретации данных; опробование подхода по совместной интерпретации данных на основе построения RGB-схемы.

Обобщенная модель миграции нефтепродуктов в грунтах

Общая модель распределения нефтепродуктов в геологической среде включает три зоны (рис. 1):

- донорская, в которой происходит изливание нефтепродуктов в грунты;
- транзитная, в которой происходит горизонтальное перемещение легких нефтепродуктов;
- зона вторичного накопления, которая обычно образуется в прибрежной зоне водоемов под воздействием геохимического барьера.

Помимо вышеописанных зон модель включает различные фазы распределения легких нефтепродуктов (по [6]):

- газообразная фаза (образуется в областях, где происходит улетучивание углеводородов и продуктов их биодеструкции);
- остаточная фаза (нефтепродукты находятся в зоне аэрации в состоянии остаточного насыщения и не перемещаются под действием силы тяжести);
- свободная фаза (распространение идет в области капиллярной каймы, флюид смешивается с воздухом и водой и имеет 30–50%-ное насыщение углеводородами [7]);
- растворенная фаза в водоносных горизонтах; по сравнению со свободной фазой концентрация углеводородов нефти здесь намного ниже.

Согласно модели, показанной на рис. 1, основные трансформации происходят в остаточ-

ной и свободной фазах. Авторы [6] утверждают, что максимальные изменения геофизических признаков происходят в переходной, капиллярной и верхней части зон насыщения. Именно в этих зонах встречаются самые высокие популяции микроорганизмов-нефтедеструкторов и наблюдаются максимальные изменения физических свойств. Здесь изменяется минерализация воды, поровое пространство вмещающих грунтов, образуются биоминералы, биопленки, частично растворяются вмещающие породы и т.д. В результате возникает множество изменений свойств грунтов, которые получают отражение в геофизических полях [8–10].

Физические свойства интервалов разреза, загрязненных нефтепродуктами, достаточно динамичны и имеют сложный характер распределения во временной и пространственной областях.

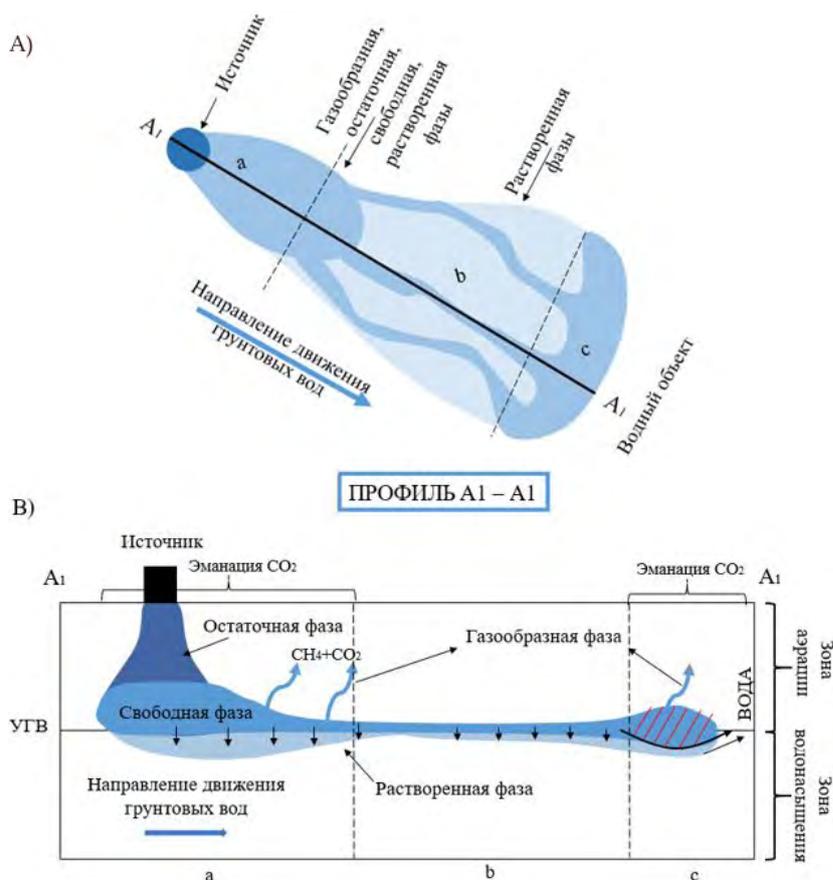


Рис. 1. Модель распространения нефтепродуктов в грунтах вблизи водного объекта: А – площадное распределение, В – разрез по линии А₁-А₁. а – донорская зона, б – транзитная зона, с – зона вторичного накопления; красными штрихами выделен геохимический барьер (рисунок адаптирован из [6, 8]).

Fig. 1. Model of oil product distribution in soils near a water body: А – areal distribution, В – A₁-A₁ section. а – donor zone, б – transit zone, с – zone of secondary accumulation; geochemical barrier is marked with red dashes (figure is adapted from [6, 8]).

Так, например, удельное электрическое сопротивление ($УЭС$), получаемое по результатам электроразведки, по-разному отражает две формы нахождения нефтепродуктов в среде: «свежие», которые имеют высокие значения $УЭС$, и «старые», которые подверглись биодegradации [11]. Однако низкие значения $УЭС$ могут наблюдаться и на участках с высокой глинистостью грунта, не имеющих отношения к процессам биодegradации в состарившихся углеводородных линзах, в то время как высокие значения удельного сопротивления могут указывать на снижение насыщенности, контакт с уплотненными породами или свежие разливы [11, 12].

На участках, интенсивно загрязненных нефтепродуктами, наблюдается снижение скорости распространения сдвиговых волн (V_s). Этот параметр не зависит от степени насыщения породы жидкостью, состава жидкости и контролируется в основном прочностными и деформационными характеристиками грунтов. Так как прочностные характеристики некоторых дисперсных грунтов (особенно грунтов, подстилающих нефтебазу, о которой говорится в этой работе) под воздействием нефтепродуктов снижаются [7], это приводит к снижению значений V_s .

В статье [6] отмечается, что «свежие» разливы легких нефтепродуктов проявляют свойства изоляторов ($*0.001$ мСм/м) по отношению к пластовым флюидам ($*0.1-1$ мСм/м для пресной воды) и имеют низкую относительную диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 2-3$) по сравнению с водой ($\epsilon = 80$) и водонасыщенными песками ($\epsilon = 7-15$). Замена поровой воды и воздуха в загрязненной зоне компонентами легких нефтепродуктов может приводить к увеличению амплитуд отраженного сигнала на радарограммах (например, 10) за счет изолирующих свойств поллютанта. В то же время процесс биодegradации вызывает изменения химических и физических свойств загрязненной среды, что приводит к увеличению объемной электропроводности, а присутствие проводящих минеральных фаз может вызвать затухание зондирующего импульса [6].

Кроме того, в результате дegradации углеводородов происходит выделение газов (метана и двуокиси углерода) как продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, что фиксируется в результатах газогеохимических работ.

Основные алгоритмы классификация геофизических полей

Комплексный подход к решению вопросов интерпретации геофизических данных в ряде работ описывается как наиболее приемлемый [13–15]. Разрабатываются новые методические решения по комплексированию геофизических методов в полевых условиях [16–18], создаются новые алгоритмы совместной интерпретации данных нескольких методов [19, 20]. Проблема заключается в том, что интерпретация геофизических данных в значительной мере основывается на визуальном сравнении результатов, что вносит большую долю субъективизма. Поэтому особенно актуальны методические подходы, благодаря которым удается наиболее адекватно и достоверно передать возможную геологическую обстановку и гидрогеологические особенности изучаемого района [5, 21], влияющие на распространение нефтепродуктов в среде.

Алгоритмы комплексной интерпретации можно разделить на несколько категорий:

- алгоритмы совместной инверсии данных (одновременная совместная инверсия и последовательная совместная инверсия) [22, 23];
- алгоритмы, основанные на классификации геофизических данных [9, 24, 25].

Суть алгоритмов, объединенных в первую группу, заключается в нахождении петрофизической или геометрической связи между различными физическими свойствами целевых объектов. Для них характерны проблемы с разрешающей способностью, пространственным и временным масштабами, а также с тем, что различные методы могут получить отклики от принципиально разных геологических объектов, которые усложняют условия количественной интерпретации (определение условий залегания и других параметров целевых геологических объектов и отражающих горизонтов) [15, 24, 26].

Вторая группа методов основана в первую очередь на статистическом анализе набора геофизических моделей [27, 28]. Здесь важно то, что между физическими параметрами, получаемыми в ходе инверсии геофизических полей, не существует фундаментальных связей как таковых, а есть только эмпирические зависимости, по которым можно построить правдопо-

добные модели только локально для какого-то одного участка с однородным литологическим строением [29]. Соответственно, методически верно будет проводить совместную интерпретацию после независимой инверсии каждого отдельного метода [24]. Дальнейшая совместная статистическая интерпретация геофизических данных может описать корреляцию между физическими параметрами без наложения «нереалистичных» эмпирических ограничений. Такой подход относится к задачам распознавания образов, использующимся в различных отраслях (см., например, [30]). Результатом работ является разделение объектов или, в случае геофизических исследований, физических признаков различной природы на классы с целью дальнейшей идентификации принадлежности полученных классов к геологическим объектам [31]. В частности, комплексный анализ данных позволяет проводить геологическое картирование территории с конечным построением карт, на которых отображены целевые области распространения поллютантов, области с иммобилизованными нефтепродуктами, а также возможные пути миграции загрязнения.

Распознавание образов может осуществляться «с учителем» и «без учителя». Первый вариант осуществим в том случае, когда имеется априорная геологическая информация о местонахождении объекта исследований. Комплексный анализ заключается в разделении всей рассматриваемой территории на «перспективную», т.е. содержащую искомые объекты, и «пустую», включающую только вмещающие породы, области.

В свою очередь, комплексный анализ на основе обучения «без учителя» – классификация или кластеризация [31] – основывается только на статистическом разделении тех данных, которые были получены в ходе инструментальных измерений. Эталонных образцов здесь не предусматривается, поэтому основной принцип алгоритмов основывается на самообучении. Из-за отсутствия эталонных образцов при использовании подходов на основе распределения кластеров не выделяются отдельные литологические единицы. Впоследствии этот недостаток может быть исправлен путем «ручного» определения [32]. В целом, основным преимуществом кла-

стеризации является объективность и минимальная зависимость от субъективного мнения интерпретатора.

Любые проектные решения по рекультивации загрязненных территорий и извлечению нефтепродуктов предусматривают изыскательские работы. На первом этапе изучения площадей, загрязненных нефтепродуктами, для которых не имеется достаточной информации о вещественном составе грунтов, для выбора оптимальной сети бурения можно провести безэталонную классификацию по данным опережающих геофизических исследований. Далее, по выделенным объектам на схеме распределения классов намечается расположение скважин для верификации геологического строения. Одним из методических подходов, способным на качественном уровне определить грунты с различными петрофизическими характеристиками, является RGB-синтез [33].

RGB-синтез позволяет провести классификацию геофизических данных по трем различным параметрам. Каждому параметру соответствует свой цветовой индикатор (красный, R; зеленый, G; синий, B), нормированный от 0 до 255. Минимумы значений соответствуют черному (отсутствие цвета), максимумы – наиболее яркому выбранному цвету. На выходе алгоритма формируется изображение, на котором наглядно выделяются области с различными входными параметрами путем оптического смешивания красного, зеленого и синего цветов, где минимум по каждому из параметров отмечается черным цветом (0, 0, 0), максимум по каждому из параметров – белым цветом (255, 255, 255), а все промежуточные сочетания формируют полную цветовую гамму, которая легко интерпретируется с опорой на правила смешивания цветов. Например, синий цвет определяется как (0, 0, 255), красный как (255, 0, 0), фиолетовый – (255, 0, 255) и т.д. Основное отличие от безэталонной классификации, выполненной в специализированном ПО, заключается в том, что количество классов при синтезе ограничено очень большой величиной ($256 \cdot 256 \cdot 256 = 16\,777\,216$), поэтому схема с классами выглядит более гладкой, а к результату не привязываются искусственные четкие границы классов, которых нет в реальных полях и входных данных.

Материалы и методы

Объектом исследования является территория, прилегающая к нефтебазе, расположенной на р. Волга, которая на протяжении десятков лет подвергалась воздействию нефтепродуктового загрязнения. Рельеф территории имеет слабый уклон в сторону водного объекта.

Первые слабые выходы нефтепродуктов вдоль береговой линии были зафиксированы в 1995 г. В 1996 г. на территории нефтебазы были пробурены скважины, позволяющие наблюдать за степенью загрязнения подземных вод. В 1997 г. на нефтебазе были смонтированы установки по очистке подземных вод, однако из-за низкого процентного содержания нефтепродуктов в подземных водах работа установки оказалась неэффективной и была прекращена. Продолжающиеся наблюдения свидетельствовали о снижении загрязненности подземных вод под нефтебазой. Однако в июле 1999 г. произошел новый, более мощный сброс нефтепродуктов в реку. С этого времени началось планомерное изучение всей прилегающей к нефтебазе территории, включающее, в том числе, работы по откачке нефтепродуктов по линии скважин, проходящей вдоль берега на удалении 100–130 м.

Согласно имеющимся сведениям, территория расположена в пределах первой и второй надпойменных террас, сложена песками с линзами и прослоями суглинков, в основании разреза отмечаются галька и гравий [34].

Геологическое строение изучаемой площади в целом простое, выдержанное в плане и разрезе. Зона аэрации и верхняя часть первого от поверхности водоносного горизонта представлена песками. В пределах зоны аэрации повсеместно развит слой суглинка. Минимальная мощность суглинка наблюдается в районе нефтебазы – 1–1.5 м. В направлении берега мощность слоя закономерно возрастает до 3–5, а на юго-востоке территории – до 8 м.

Помимо грунтовых вод, уровень которых приурочен к уровню реки, режимными скважинами в ближайшей окрестности нефтебазы на глубине 3–6 м вскрывается верховодка, которая приурочена к кровле слоя суглинков и выклинивается в восточном направлении.

Полевой геофизический материал был получен в ходе проведения полевых работ геофизическим отрядом компании ООО «ФРОНТ

Геология» под руководством С.В. Шакуро. Результаты представлены данными электроразведки (ВЭЗ), сейсморазведки (MASW) и газогеохимии ($\Sigma\text{СН}$, CO_2 , O_2). Сопоставление выполняется по трем параметрам: удельное электрическое сопротивление, скорость поперечных волн и концентрация углекислого газа в почвенном воздухе (рис. 2). Для дальнейшего анализа построены карты распределения скорости сдвиговых волн и удельного электрического сопротивления в районе урвневой поверхности грунтовых вод.

На рис. 2 а, б, с показаны модели распределения свойств и параметров: удельное электрическое сопротивление грунта, скорость распространения сдвиговых волн, концентрация углекислого газа в почвенном воздухе. Карты распределения УЭС и V_s были построены при помощи статистического анализа, выполненного в ПО «ВЭЗ Мастер» (С.В. Шакуро). На карте распределения удельного электрического сопротивления пониженные значения УЭС, характерные для областей углеводородного загрязнения, находятся в западной части. На карте распределения скоростей сдвиговых волн пониженные значения, маркирующие на данной территории загрязненные грунты, неоднородно распределены по площади. Четче всего оконтурить аномалию возможно по результатам газогеохимических исследований. Здесь концентрации углекислого газа закономерно возрастают по направлению к южной части, где достигают высоких значений, так как нефтепродукты встречают на своем пути геохимические барьеры, способствующие их накоплению.

Схемы с распределением параметров были загружены в программу RGB-синтеза. С помощью программы распределение свойств задавалось в новом варианте, удобном для дальнейшей совместной инверсии: красный, синий или зеленый. При этом минимальная интенсивность цвета соотносится с минимумами значений, наиболее яркий оттенок – с максимумами (рис. 2 а₁, б₁, с₁).

Предполагается, что для грунтов, содержащих нефтепродукты, длительное время находящиеся в подповерхностном пространстве, характерны пониженные значения удельного электрического сопротивления и скоростей сдвиговых волн, повышенные концентрации углекислого газа.

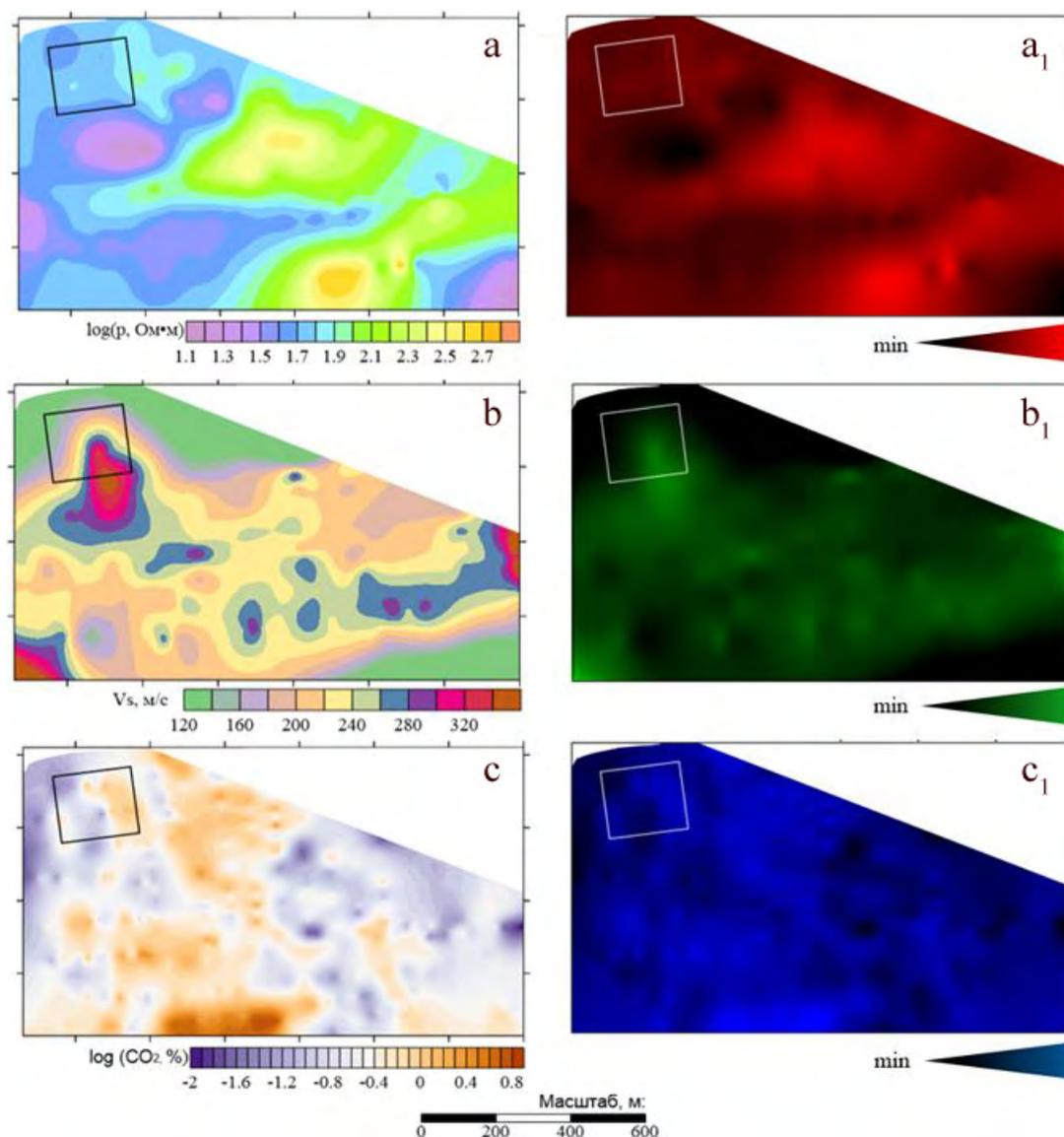


Рис. 2. Исходные данные для RGB-синтеза, полученные после обработки полевых материалов и в цветовой раскраске: а–а₁ – карта логарифма удельного электрического сопротивления, б–b₁ – карта скорости сдвиговых волн, с–с₁ – карта логарифма концентрации углекислого газа. Квадрат – контур нефтебазы.

Fig. 2. Initial data for RGB-synthesis obtained after field material processing and in colour-coding: а–а₁ – map of the logarithm of electrical resistivity, б–b₁ – map of shear-wave velocity, с–с₁ – map of the logarithm of carbon dioxide concentration. The square is the contour of the oil depot.

Результаты и обсуждение

Предлагаемый способ интерпретации данных на качественном уровне может помочь определить грунты с различными петрофизическими характеристиками, так как в процессе синтезирования происходит наложение различных свойств на одну основу. Поэтому цветовые оттенки соответствуют различным классам с различными петрофизическими свойствами (рис. 3). Предполагается, что здесь области, загрязненные нефтепродуктами, должны иметь темно-синий оттенок, так как

распределение углекислого газа задано в синем цвете, а значения УЭС и V_s в пределах загрязненных областей понижены и в цветовой шкале должны приближаться к черному. Предполагаемый контур загрязнения показан на рис. 3. Отмечается яркая газогеохимическая аномалия в южной части, что может быть связано с зоной вторичного накопления в прибрежной части исследуемого участка. Также отдельно выделяется аномалия в юго-восточной части, интерпретируемая авторами как аномалия загрязнения грунтовых вод нефте-

продуктами, что, вероятно, связано со сложным расположением путей миграции углеводородов с грунтовыми водами.

До проведения RGB-анализа была выполнена раздельная интерпретация данных сейсморазведочных, электроразведочных работ и газогеохимии, результаты которых были обобщены в единую модель распределения загрязнения. Для сравнения полученных данных по результатам качественной интерпретации по данным RGB-синтеза и по результатам раздельной интерпретации проведено наложение контуров загрязнения в грунтовых водах, представленное на рис. 3 (справа). Отмечается, что предполагаемые контуры распространения нефтепродуктов имеют практически идентичные очертания. RGB-синтез частично детализирует расположение целевых областей.

Таким образом, на основе синтезирования многопризнаковых данных, включающих в себя геоэлектрические, сейсмоскоростные свойства грунтов и концентрацию углекислого газа в почвенном воздухе, удалось построить схему, по которой легко очертить предполагаемые контуры распространения загрязнения.

Использование такого экспресс-варианта комплексирования – в виде RGB-наложения данных различных геофизических и геохимических методов с интерпретацией единой схемы, отражающей все интересующие параметры, дает возможность оперативно локали-

зовать зону загрязнения, а с учетом направления движения подземных вод спрогнозировать ее перемещение со временем. Это позволит организовать точную и относительно быструю очистку и рекультивацию территории, сократив при этом объемы бурения и отбора проб, так как они будут требоваться не для оконтуривания зоны загрязнения, а лишь для заверки выделенных аномалий.

Заключение

В представленной работе рассмотрен алгоритм комплексной многопризнаковой классификации геофизических данных при помощи RGB-синтеза для территории, загрязненной нефтепродуктами. Проанализирована область, примыкающая к нефтебазе, которая долгое время подвергалась воздействию поллютантов. По результатам качественной интерпретации геофизической информации авторами построена схема с предполагаемым контуром распространения нефтепродуктов на изучаемой территории.

Разработанный алгоритм может использоваться для задач оконтуривания разливов нефтепродуктов при достаточном количестве информации по геофизическим или другим информативным методам (не менее 3) на этапе определения площади распространения загрязнения для участков, где нефтепродукты находятся в грунтах длительное время.

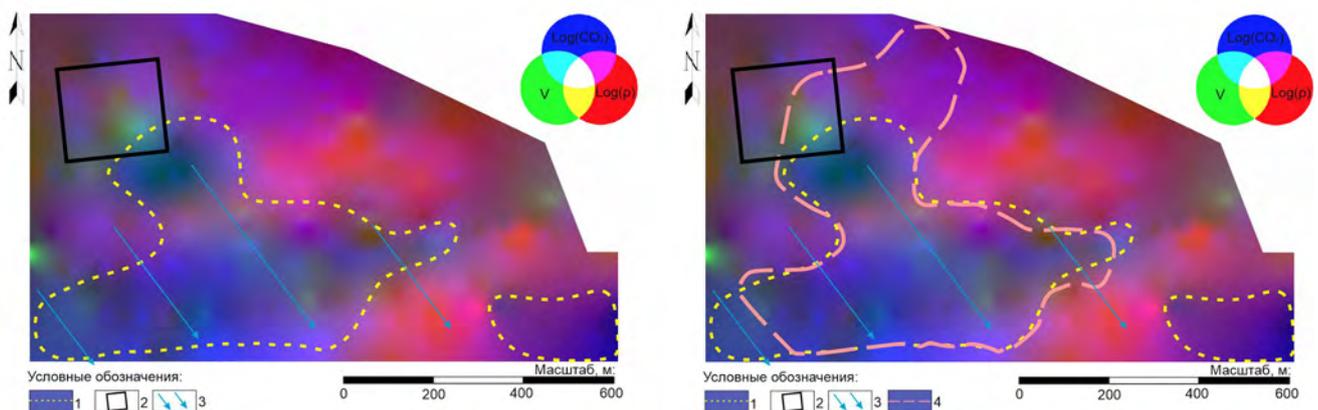


Рис. 3. Результаты RGB-синтеза (слева) и сравнение результатов RGB-синтеза и раздельной интерпретации данных (справа). 1 – область распространения нефтепродуктов по результатам синтеза геофизических данных, 2 – территория нефтебазы, 3 – направление движение грунтовых вод, 4 – область распространения нефтепродуктов по результатам раздельной интерпретации геофизических данных. Цветовая шкала: $\text{Log}(\rho)$ – логарифм удельного электрического сопротивления, Ом·м; $\text{Log}(\text{CO}_2)$ – логарифм концентрации углекислого газа; V – скорость поперечных волн, м/с.

Fig. 3. RGB-synthesis results (left) and comparison of RGB-synthesis and separate data interpretation results (right). 1 – area of oil products distribution according to the results of geophysical data synthesis; 2 – area of oil depot; 3 – groundwater flow direction, 4 – area of oil products distribution according to the results of separate interpretation of geophysical data. Colour scale: $\text{Log}(\rho)$ – logarithm of electrical resistivity, Ohm·m; $\text{Log}(\text{CO}_2)$ – logarithm of carbon dioxide concentration; V – S-wave velocity, m/s.

Также в дальнейшем для объектов, на которых отсутствует или минимальна априорная геологическая информация, на RGB-схеме по различным цветам могут быть выделены отдельные петрофизические классы пород. В каждом выбранном месте можно провести прямые наблюдения и определить свойства грунтов, например коэффициент фильтрации, а результаты интерполировать для каждого класса отдельно.

Список литературы

1. Титов К.В., Ильин Ю.Т., Коносовский П.К., Муслимов А.В., Рыбальченко О.В., Орлова О.Г., Мено А. **2012**. Изменение физических свойств загрязненного нефтепродуктами песка при бактериальном воздействии. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 5: 455–469.
2. Abdel Aal G.Z., Slater L.D., Atekwana E.A. **2006**. Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics*, 71: H13–H24. <https://doi.org/10.1190/1.2187760>
3. Atekwana E.A., Atekwana Eliot A., Werkema D.D., Allen J.P., Smart L.A., Duris J.W., Cassidy D.P., Sauck W.A., Rossbach S. **2004**. Evidence for microbial enhanced electrical conductivity in hydrocarbon-contaminated sediments. *Geophysical Research Letters*, 31: L23501.1–L23501.4. <https://doi.org/10.1029/2004gl021359>
4. Personna Yv.R., Ntarlagiannis D., Slater L., Yee N., O'Brien M., Hubbard S. **2008**. Spectral induced polarization and electrodic potential monitoring of microbially mediated iron sulfide transformations. *J. of Geophysical Research*, 113(2): C02020.1–C02020.13. <https://doi.org/10.1029/2007jg000614>
5. Lelièvre P.G., Farquharson C.G. **2016**. Integrated imaging for mineral exploration. In: *Integrated imaging of the Earth: Theory and applications*, p. 61–95. (Wiley Online Library, Geophysical Monograph Series). <https://doi.org/10.1002/9781118929063.ch8>
6. Atekwana E.A., Atekwana Eliot A. **2010**. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. *Surveys in Geophysics*, 31: 247–283. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9089-8>
7. Sauck W.A. **2000**. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *J. of Applied Geophysics*, 44(2–3): 151–165. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00021-X)
8. Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.I., Sale T. **2017**. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 37(3). <https://doi.org/10.1111/gwmmr.12219>
9. Спичак В.В., Безрук И.А., Гойдина А.Г. **2015**. Построение трехмерных кластерных петрофизических моделей геологической среды по совокупности геофизических данных, измеренных на опорных профилях. *Разведка и охрана земных недр*, 4: 41–45.
10. Castro D., Branco R.M.G. **2003**. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: A case history. *J. of Applied Geophysics*, 54(1): 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.japrgo.2003.08.021>
11. Orozco A.F., Ciampi P., Katona T., Censini M., Papini M.P., Deidda G.P., Cassiani G. **2021**. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging. *Science of the Total Environment*, 768: 144997. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144997>
12. Orozco A.F., Micić V., Bücken M., Gallistl J., Hofmann Th., Nguyen F. **2019**. Complex-conductivity monitoring to delineate aquifer pore clogging during nanoparticles injection. *Geophysical Journal International*, 218(3): 1838–1852. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz255>
13. Golizdra G.Y. **1980**. Statement of the problem of comprehensive interpretation of gravity fields and seismic observations. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 16: 535–539.
14. Haber E., Oldenburg D. **1997**. Joint inversion: a structural approach. *Inverse Problems*, 13(1): 63–77. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/13/1/006>
15. Hu W., Abubakar A., Habashy T.M. **2009**. Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints. *Geophysics*, 74(6): R99–R109. <https://doi.org/10.1190/1.3246586>
16. Данильев С.М., Данильева Н.А., Исакова Е.П., Ашкар Г.Х. **2020**. Исследование трещиноватости на месторождении облицовочного камня с привлечением метода георадиолокации. *Известия ТИУ*, 9: 140–145.
17. Glazunov V.V., Shtengel V.G., Nedyalkov V.S., Efimova N.N., Danilev S.M. **2018**. Combined investigation by thermal imaging and georadar scanning for voids detection under reinforced concrete slabs of fastening soil slopes of hydraulic structures. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2018: 1–11. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800474>
18. Miller A.A., Gorelik G.D., Budanov L.M. **2019**. Substantiation of the optimal GIS complex for the allocation of water-containing reservoirs on the example of the analysis of well logging results in the Leningrad region. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2019: 1–8. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901693>
19. Danileva N., Danilev S., Bolshakova N. **2020**. Isolation of brine aquifers in carbonate rocks of above-salt sediments by a limited set of geophysical studies of wells. In: *Engineering and Mining Geophysics, Saint Petersburg*, 2020: 1–5. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053066>
20. Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. **2022**. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии. *Записки Горного института*, 254: 217–233. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23>
21. Abubakar A., Gao G., Habashy T.M., Liu J. **2012**. Joint inversion approaches for geophysical electromagnetic and elastic full-waveform data. *Inverse Problems*, 28(5): 055016. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/28/5/055016>
22. Colombo D., De Stefano M. **2007**. Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data: Application to prestack depth imaging. *The Leading Edge*, 26: 326–331. <https://doi.org/10.1190/1.2715057>
23. Moorkamp M., Jones A.G., Fishwick S. **2010**. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B4). <https://doi.org/10.1029/2009jb006369>
24. Спичак В.В. **2009**. Современные подходы к комплексной инверсии геофизических данных. *Геофизика*, 5: 10–19.

25. Спичак В.В., Безрук И.А., Попова И.В. **2008**. Построение глубинных кластерных петрофизических разрезов по геофизическим данным и прогноз нефтегазоносности территорий. *Геофизика*, 5: 43–45.
26. Agostinetti N.P., Bodin Th. **2018**. Flexible coupling in joint inversions: A Bayesian structure decoupling algorithm. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 8798–8826. <https://doi.org/10.1029/2018JB016079>
27. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. **2018**. A geophysical k-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy). *J. of Applied Geophysics*, 156: 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>
28. Yu Siwei, Ma Jianwei. **2020**. Data-driven geophysics: from dictionary learning to deep learning. *ArXiv abs/2007.06183*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.06183>
29. Bedrosian P.A., Maercklin N., Weckmann U., Bartov Y., Ryberg T., Ritter O. **2007**. Lithology-derived structure classification from the joint interpretation of magnetotelluric and seismic models. *Geophysical Journal International*, 170(2): 737–748. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03440.x>
30. Akhmetshin E.M., Kolpak E.P., Sulimova E.A., Kireev V.S., Samarina E.A., Solodilova N.Z. **2017**. Clustering as a criterion for the success of modern industrial enterprises. *International Journal of Applied Business and Economic Research*, 15(23): 221–231.
31. Никитин А.А., Булычев А.А. **2015**. *Комплексный анализ и комплексная интерпретация геофизических полей: учеб. пособие*. М.: ВНИИГеосистем, 94 с.
32. Kotyrba V., Schmidt V. **2014**. Combination of seismic and resistivity tomography for the detection of abandoned mine workings in Münster/Westfalen, Germany: Improved data interpretation by cluster analysis. *Near Surface Geophysics*, 12(3): 415–426. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013056>
33. *RGB-синтез для комплексной интерпретации данных сейсмических методов: Свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616804 РФ*. **2021**. Авт.: Григорьев Г.К., Мингалева Т.А., Сенчина Н.П. Заявл. 23.04.2021; № 2021615994; опубл. 27.04.2021, Бюл. № 5.
34. *Цифровые каталоги геологических карт*. СПб., Всерос. науч.-исслед. геол. ин-т им. А.П. Карпинского. URL: https://vsegei.ru/ru/info/catalog_ggk/ (дата обращения 21.09.2022).
- References**
- Titov K.V., Il'in Yu.T., Konosavskii P.K., Muslimov A.V., Rybal'chenko O.V., Orlova O.G., Meno A. **2012**. Transformation of physical properties of sand contaminated with oil products upon bacterial impact. *Geoekologiya*, 5: 455–469 (In Russ.). EDN: PFJIDJ
 - Abdel Aal G.Z., Slater L.D., Atekwana E.A. **2006**. Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics*, 71: H13–H24. <https://doi.org/10.1190/1.2187760>
 - Atekwana E.A., Atekwana Eliot A., Werkema D.D., Allen J.P., Smart L.A., Duris J.W., Cassidy D.P., Sauck W.A., Rossbach S. **2004**. Evidence for microbial enhanced electrical conductivity in hydrocarbon-contaminated sediments. *Geophysical Research Letters*, 31: L23501.1–L23501.4. <https://doi.org/10.1029/2004gl021359>
 - Personna Y.R., Ntarlagiannis D., Slater L., Yee N., O'Brien M., Hubbard S. **2008**. Spectral induced polarization and electrodic potential monitoring of microbially mediated iron sulfide transformations. *J. of Geophysical Research*, 113(2): C02020.1–C02020.13. <https://doi.org/10.1029/2007jg000614>
 - Lelièvre P.G., Farquharson C.G. **2016**. Integrated imaging for mineral exploration. In: *Integrated imaging of the Earth: Theory and applications*, p. 61–95. (Wiley Online Library, Geophysical Monograph Series). <https://doi.org/10.1002/9781118929063.ch8>
 - Atekwana E.A., Atekwana Eliot A. **2010**. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. *Surveys in Geophysics*, 31: 247–283. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9089-8>
 - Sauck W.A. **2000**. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *J. of Applied Geophysics*, 44(2–3): 151–165. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00021-X)
 - Garg S., Newell C.J., Kulkarni P.R., King D.C., Adamson D.T., Renno M.I., Sale T. **2017**. Overview of natural source zone depletion: Processes, controlling factors, and composition change. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 37(3). <https://doi.org/10.1111/gwmr.12219>
 - Spichak V.V., Bezruk I.A., Goydina A.G. **2015**. Construction of the three-dimensional cluster petrophysical models of geological medium based on the geophysical data collected along reference profiles. *Prospect and protection of mineral resources*, 4: 41–45. (In Russ.). EDN: TOVFLJ
 - Castro D., Branco R.M.G. **2003**. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: A case history. *J. of Applied Geophysics*, 54(1): 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.08.021>
 - Orozco A.F., Ciampi P., Katona T., Censini M., Papini M.P., Deidda G.P., Cassiani G. **2021**. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging. *Science of the Total Environment*, 768: 144997. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144997>
 - Orozco A.F., Micić V., Bückner M., Gallistl J., Hofmann Th., Nguyen F. **2019**. Complex-conductivity monitoring to delineate aquifer pore clogging during nanoparticles injection. *Geophysical Journal International*, 218(3): 1838–1852. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz255>
 - Golizdra G.Y. **1980**. Statement of the problem of comprehensive interpretation of gravity fields and seismic observations. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 16: 535–539.
 - Haber E., Oldenburg D. **1997**. Joint inversion: a structural approach. *Inverse Problems*, 13(1): 63–77. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/13/1/006>
 - Hu W., Abubakar A., Habashy T.M. **2009**. Joint electromagnetic and seismic inversion using structural constraints. *Geophysics*, 74(6): R99–R109. <https://doi.org/10.1190/1.3246586>
 - Daniliev S.M., Danilieva N.A., Isakova E.P., Ashkar G.K. **2020**. Research of cracking at facing stone deposit using the georadar method. *Izvestiya TPU = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 331(9): 140–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/9/2816>
 - Glazunov V.V., Shtengel V.G., Nedyalkov V.S., Efimova N.N., Danilev S.M. **2018**. Combined investigation by thermal imaging and georadar scanning for voids detection under reinforced concrete slabs of fastening soil slopes of hydraulic structures. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2018: 1–11. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800474>
 - Miller A.A., Gorelik G.D., Budanov L.M. **2019**. Substantiation of the optimal GIS complex for the allocation of water-

- containing reservoirs on the example of the analysis of well logging results in the Leningrad region. In: *Engineering and Mining Geophysics*, 2019: 1–8. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901693>
19. Danileva N., Danilev S., Bolshakova N. **2020**. Isolation of brine aquifers in carbonate rocks of above-salt sediments by a limited set of geophysical studies of wells. In: *Engineering and Mining Geophysics, Saint Petersburg*, 2020: 1–5. (European Association of Geoscientists & Engineers: Conf. paper). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053066>
 20. Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I., Yakovleva A.A. **2022**. Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by method of unmanned aeromagnetic survey by the example of the Neryungri district of Yakutia. *J. of Mining Institute*, 254: 217–233. (In Russ.&Engl.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23>
 21. Abubakar A., Gao G., Habashy T.M., Liu J. **2012**. Joint inversion approaches for geophysical electromagnetic and elastic full-waveform data. *Inverse Problems*, 28(5): 055016. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/28/5/055016>
 22. Colombo D., De Stefano M. **2007**. Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data: Application to prestack depth imaging. *The Leading Edge*, 26: 326–331. <https://doi.org/10.1190/1.2715057>
 23. Moorkamp M., Jones A.G., Fishwick S. **2010**. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B4). <https://doi.org/10.1029/2009jb006369>
 24. Spichak V.V. **2009**. Modern approaches to integrated geophysical data inversion. *Geophysics*, 5: 10–19. (In Russ.). EDN: SAVPXR
 25. Spichak B.V., Bezruk I.A., Popova I.V. **2008**. Deep cluster petrophysical sections construction using geophysical data for assessment of hydrocarbon potential. *Geophysics*, 5: 43–45. (In Russ.). EDN: SBKPNR
 26. Agostinetti N.P., Bodin Th. **2018**. Flexible coupling in joint inversions: A Bayesian structure decoupling algorithm. *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 8798–8826. <https://doi.org/10.1029/2018JB016079>
 27. Di Giuseppe M.G., Troiano A., Patella D., Piochi M., Carlino S. **2018**. A geophysical k-means cluster analysis of the Solfatara-Pisciarelli volcano-geothermal system, Campi Flegrei (Naples, Italy). *J. of Applied Geophysics*, 156: 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.06.001>
 28. Yu Siwei, Ma Jianwei. 2020. Data-driven geophysics: from dictionary learning to deep learning. *ArXiv abs/2007.06183*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.06183>
 29. Bedrosian P.A., Maercklin N., Weckmann U., Bartov Y., Ryberg T., Ritter O. **2007**. Lithology-derived structure classification from the joint interpretation of magnetotelluric and seismic models. *Geophysical Journal International*, 170(2): 737–748. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03440.x>
 30. Akhmetshin E.M., Kolpak E.P., Sulimova E.A., Kireev V.S., Samarina E.A., Solodilova N.Z. **2017**. Clustering as a criterion for the success of modern industrial enterprises. *International Journal of Applied Business and Economic Research*, 15(23): 221–231.
 31. Nikitin A.A., Bulychev A.A. **2015**. [*Complex analysis and complex interpretation of geophysical fields: textbook*]. Moscow: VNIIGeosystem, 94 p. (In Russ.).
 32. Kotyrba B., Schmidt V. **2014**. Combination of seismic and resistivity tomography for the detection of abandoned mine workings in Münster/Westfalen, Germany: Improved data interpretation by cluster analysis. *Near Surface Geophysics*, 12(3): 415–426. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013056>
 33. *RGB-sintez dlya kompleksnoj interpretacii dannyh nesejsmicheskikh metodov [RGB synthesis for the complex interpretation of data of non-seismic methods]*: State registration certificate of the computer program No. 2021616804 RF. **2021**. Authors: Grigoriev G.K., Mingaleva T.A., Senchina N.P. Appl. 23.04.2021; No. 2021615994; publ. 27.04.2021, Bull. No. 5. (In Russ.).
 34. *Digital catalogs of geological maps*. Russian Geological Research Institute (VSEGEI). (In Russ.). URL: https://vsegei.ru/ru/info/catalog_ggk/ (accessed 21.09.2022).

Об авторах

Мингалева Татьяна Андреевна (<https://orcid.org/0000-0002-6867-1981>), аспирант кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, tatiana.mingaleva@bk.ru

Шакуро Сергей Владимирович, генеральный директор ООО «ФРОНТ Геология», ООО «ФРОНТ Геология», Нижний Новгород, Россия, s.shakuro@gmail.com

Сенчина Наталия Петровна (<https://orcid.org/0000-0001-5458-648X>), кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, n_senchina@inbox.ru

Егоров Алексей Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>), доктор геолого-минералогических наук, профессор, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, egorov_as@pers.spmi.ru

Поступила 14.02.2023

После доработки 26.02.2023

Принята к публикации 01.03.2023

About the Authors

Mingaleva, Tatiana A. (<https://orcid.org/0000-0002-6867-1981>), Postgraduate Student, Department of Geophysics, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, tatiana.mingaleva@bk.ru

Shakuro, Sergey V., General Director, FRONT Geologiya LLC, Nizhny Novgorod, Russia, s.shakuro@gmail.com

Senchina, Natalia P. (<https://orcid.org/0000-0001-5458-648X>), Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, n_senchina@inbox.ru

Egorov, Alexey S. (<https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>), Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia, egorov_as@pers.spmi.ru

Received 14 February 2023

Revised 26 February 2023

Accepted 1 March 2023