

УДК 550.837:551.435.8:624.13.3

К ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Татаркин Алексей Викторович¹,
vsto08@mail.ru

Красильников Павел Анатольевич¹,
geolnauka@gmail.com

Мещерякова Ольга Юрьевна¹,
olgam.psu@gmail.com

Ермаков Денис Владимирович²,
ermakov@nedra.perm.ru

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

² ООО НИПППД «Недра»,
Россия, 614064, г. Пермь, ул. Л. Шатрова, 13а.

Актуальность исследования вызвана поиском прогнозных параметров и критериев изменения электрических свойств горных пород, связанных с растворением и выносом частиц горных пород на территориях с распространением отложений карбонатно-сульфатного состава. Кроме того, использование геофизических методов при одностороннем подходе восстановления физических свойств геологического разреза не всегда даёт однозначную оценку получаемых результатов. Вышеперечисленные факты указывают на необходимость поиска и оценки возможностей комплексных решений для повышения однозначности истолкования геофизических данных и достоверности прогнозных расчётов.

Цель работы заключается в разработке научно-методических основ способа оценки опасности карстово-суффозионных процессов.

Объект представлен массивом горных пород в районе развития карстово-суффозионных процессов.

Методы, использованные для достижения поставленной цели, базируются на численном моделировании электрических полей, натурных наблюдениях вертикальным электрическим зондированием в различных азимутальных направлениях, совокупном анализе геолого-геофизических данных и лабораторных исследованиях. В качестве инструментальных средств применены: аппаратный комплекс АМС-1 и системы программ ZondRes3D, «Зонд». Изучение удельного электрического сопротивления на образцах горных пород проводилось с помощью оригинальной методики без нарушения структуры и влажности монолитов. Результаты исследования отображают комплексный анализ геолого-геофизических данных, включающий теоретические расчёты в трёхмерных неоднородных средах, полевой эксперимент и верификацию прогнозной модели. Исходя из априорной информации и лабораторных данных о свойствах среды, составлена физико-геологическая модель с ослабленными областями, связанными с выносом и растворением горных пород. Выявленные закономерности положены в основу для районирования по геометризации потенциальных областей развития опасных карстово-суффозионных процессов и дальнейшего выбора защитных мероприятий по укреплению массива пород или проектных решений.

Ключевые слова:

опасные процессы, моделирование, карст, суффозия, физические свойства, электроразведка.

Введение

Суффозионно-карстовые процессы неразрывно связаны с территориями освоения и эксплуатации различных месторождений закрытого типа, нередко затрудняя ведение производственной деятельности, сопряжённой с опасными природными явлениями. Кроме того, осложняющие факторы ведут к увеличению рисков при проектировании наземно-подземных объектов [1, 2].

Как правило, на территориях, подверженных карсту, проводится районирование с последующим составлением прогнозных карт по степени опасности территории в рамках интегрального подхода или мониторинговые наблюдения [3–5]. Ранжирование осуществляется на основании имеющейся информации различного масштаба. Однако не всегда детальность выполненных исследований может удовлетворять поставленные цели и задачи, которые могут быть реше-

ны в рамках дополнительного обследования [6, 7] или физического моделирования [8].

Другим аспектом вышеуказанной проблемы при оценке карстовой опасности на осваиваемых территориях является невозможность изменения положения проектируемых сооружений относительно разрабатываемых геологических объектов. В этой ситуации возникает необходимость проведения дополнительных противокарстовых мероприятий, включая анализ расчётных решений с оценкой их рентабельности при практической реализации. Одним из способов получения исходных данных для рационального выбора оптимального решения является использование геофизических методов исследований [4, 9–11].

Цель проводимых исследований заключается в обосновании методики изучения степени закарстованности в рамках внутриметодного комплексирования геофизических методов [12–14] на примере одного из участков разрабатываемого месторождения углеводородов.

Методология и объект исследования

Для изучения закарстованных территорий с целью получения данных о природных условиях и прогнозе их изменений необходим поэтапный подход, основанный на решении следующих задач:

- анализ априорной информации;
- выбор методов исследований, достаточных для определения глубин залегания и литологии покровных и карстующихся отложений;
- составление физико-геологической модели (ФГМ) исследуемого объекта;
- проведение натурных наблюдений;
- восстановление изучаемой среды и локализация в пространстве областей разуплотнения;
- оценка изменчивости свойств отложений и гидро-геологических условий;
- комплексный анализ полученных результатов исследований с выводами о наличии (геометризации) опасных природно-технических процессов.

В качестве инструментария выбраны геофизические методы исследований, базирующиеся на использовании электрических полей [15], и методы их численного моделирования [16]. Для составления геологической модели привлечены данные бурения на карстующейся территории одного из разрабатываемых месторождений в Пермском крае, где по результатам вскрытия в ходе инженерно-геологических изысканий в скважине № 2 выявлены ослабленные зоны и полости (рис. 1). Геологический разрез в верхней его части до глубины порядка 8 м представлен глинистыми грунтами. Ниже залегают коренные породы сульфатного состава, подземные воды не встречены. При проходке скважины выделен ряд особенностей в геологическом строении разреза. Так, в интервале дисперсных грунтов отмечены зоны разуплотнения, а в отложениях гипса выделены незаполненные и заполненные глинистым материалом полости.

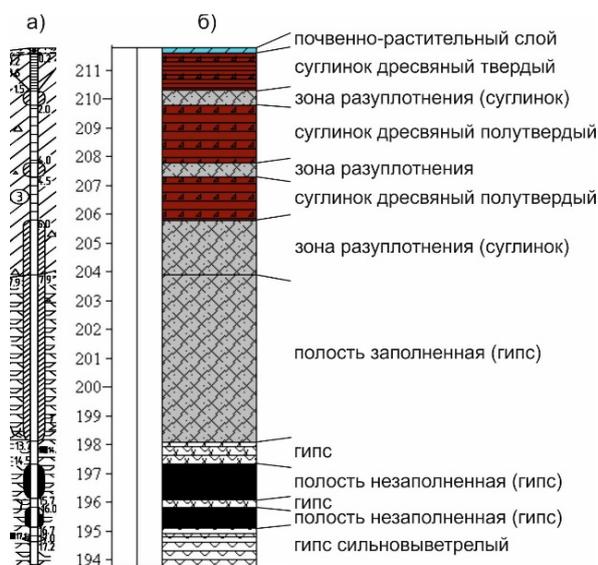


Рис. 1. Обобщенная модель геологической среды

Fig. 1. Generalized model of the geological environment

По результатам анализа априорной информации составлен обобщенный разрез геологической среды, который был положен в основу прогнозируемой ФГМ. В периферийной части, где отсутствуют ослабленные зоны, разрез модели представлен четырьмя инженерно-геологическими элементами: суглинок твердый (1а), полутвердый (1б), гипс сильновыветрелый (2а), трещиноватый (2б). Что касается нарушенных областей массива горных пород, то добавлены ещё четыре элемента с индексами «р», «н» и «з», которые связаны с суффозионно-карстовыми процессами и отображают изменения в виде зон разуплотнения в вышеперечисленных структурных единицах геологической среды (табл. 1).

Определение физических свойств элементов дисперсных грунтов, выделенных на рисунке, выполнялось с учётом диаграммы распределения электрических сопротивлений для Приволжского и Северо-Западного Федерального округов [17]. Диаграмма составлена на основании результатов лабораторных измерений удельного электрического сопротивления (УЭС) с применением оригинальной методики. Суть методики заключается в использовании микроустановки на поверхности образцов произвольной формы и размеров без нарушения их герметизации и сплошности. Влияние геометрических размеров образцов оценивается по рассчитанным в ходе численного моделирования палеткам. Данный способ позволяет оперативно и достоверно оценить УЭС грунтов без дополнительного отбора проб. Характеристики сульфатных пород получены исходя из анализа среднестатистических данных в рамках изучаемого региона.

По результатам анализа параметрической информации для составленной геологической модели выделены диапазоны изменения удельного электрического сопротивления при условии отсутствия подземных вод и нормальной минерализации порядка 0,3–0,5 г/л (табл. 1).

Таблица 1. Электрические характеристики пород

Table 1. Electrical characteristics of rocks

Номер элемента Item number	Порода Rock	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м Electrical resistivity, Ohms·m
1а, 1б	Суглинок (твердый, полутвердый) Loam (solid, semi-solid)	20–45
1р	Зона разуплотнения (суглинок) Decompression zone (loam)	10–20
2а, 2б	Гипс (сильновыветрелый, трещиноватый) Gypsum (strongly weathered, cracked)	200–700
2н	Полость незаполненная (гипс) Cavity is unfilled (gypsum)	100–2000
2з	Полость заполненная (гипс) Filled cavity (gypsum)	20–50

Приведённые выше исходные данные прогнозируемой ФГМ были положены в основу численных расчётов в трёхмерной среде. В качестве инструмента использовано программное обеспечение А.Е. Каминского для моделирования электрических полей на постоянном токе ZondRes3D [18].

Пространственное распределение удельного электрического сопротивления исходной модели отображает четыре основных инженерно-геологических элемента: суглинок твердый, суглинок полутвердый, гипс сильноветревший (трещиноватый) и пять ослабленных ассиметричных зон (табл. 1, рис. 2, б).

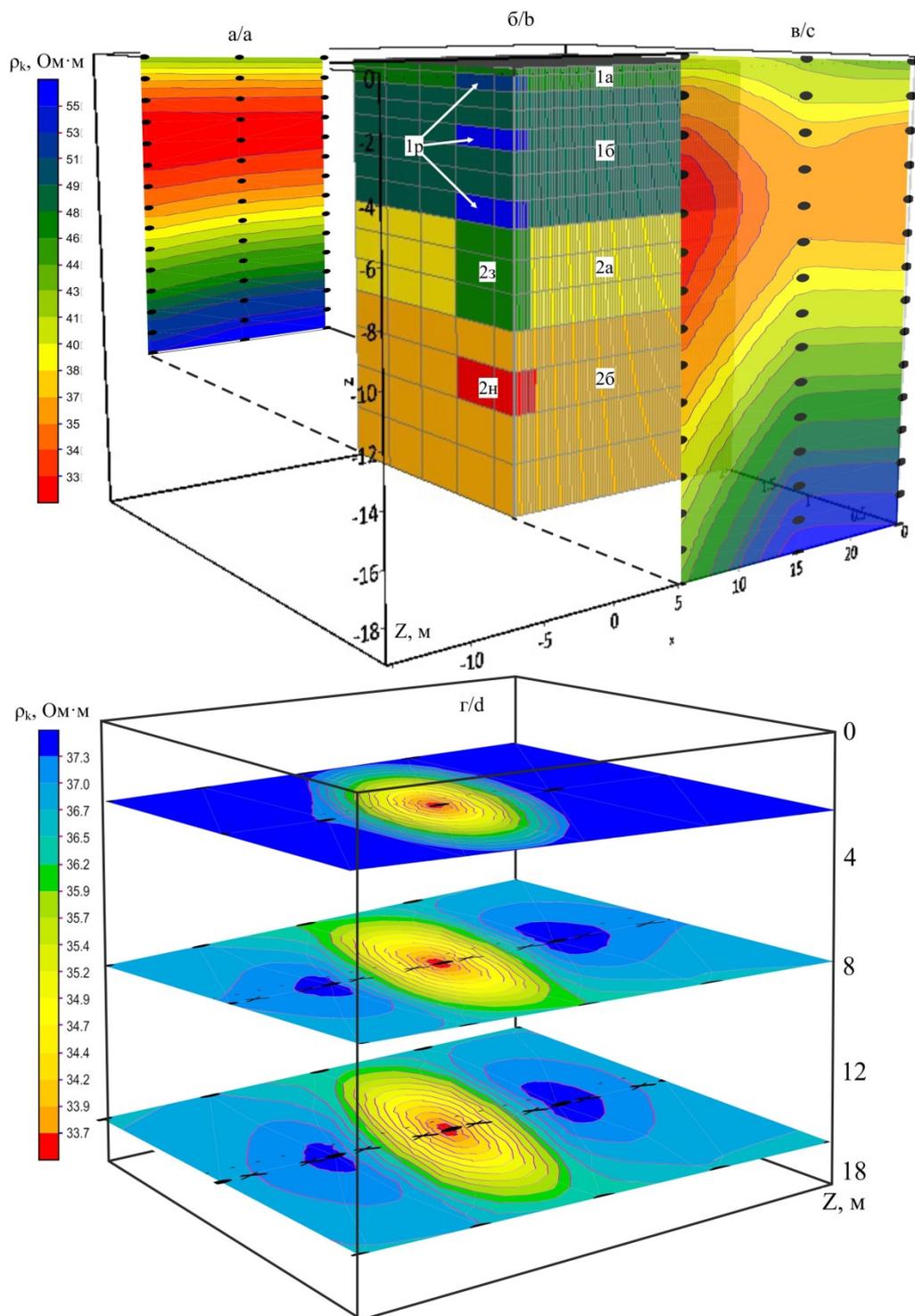


Рис. 2. Результаты численного моделирования на различных удалениях от объектов в вертикальной (а–в) и горизонтальной плоскостях (г)

Fig. 2. Results of numerical simulation at various distances from objects in the vertical (a–c) and horizontal planes (d)

Первые три ослабленных зоны мощностью от 0,5 до 2,0 м локализованы в дисперсных грунтах и характеризуются уменьшением УЭС на фоне вмещающих отложений за счёт суффозионных процессов и инфильтрации поверхностных вод. Две остальные зоны располагаются в коренных отложениях и представлены карстовыми полостями. В верхней части гипсов полость является заполненной, что ещё раз указывает на её связь с глинистыми грунтами и вертикальную миграцию их за счёт размыва кровли сульфатных пород и суффозионных процессов.

В связи с этим данная область выделена пониженными значениями сопротивления. Вторая же зона объединяет две незаполненные полости в гипсах общей мощностью 2 м и, как следствие, характеризуется повышением УЭС относительно общего фона. Локальный характер и отсутствие заполнителя в зоне разуплотнения указывает на генезис, определяемый движением подземных вод в горизонтальном направлении, и пассивную фазу карстообразования [19, 20].

Результаты численных расчётов для описанной выше модели представлены в виде вертикальных и горизонтальных сечений поля кажущихся сопротивлений (КС), на которых выделяется ряд особенностей (рис. 2).

Так, например, на проекции разреза, полученного по линии наблюдений, проходящей в непосредственной близости к зонам разуплотнения, отмечается повышение дифференциации электрических свойств как по вертикали, так и по латерали. При удалении от объекта на расстояние полутора длин его простираения электрические свойства слабо дифференцированы вкрест простираения поисковых объектов, но при этом отмечаются морфологические изменения поля кажущихся сопротивлений.

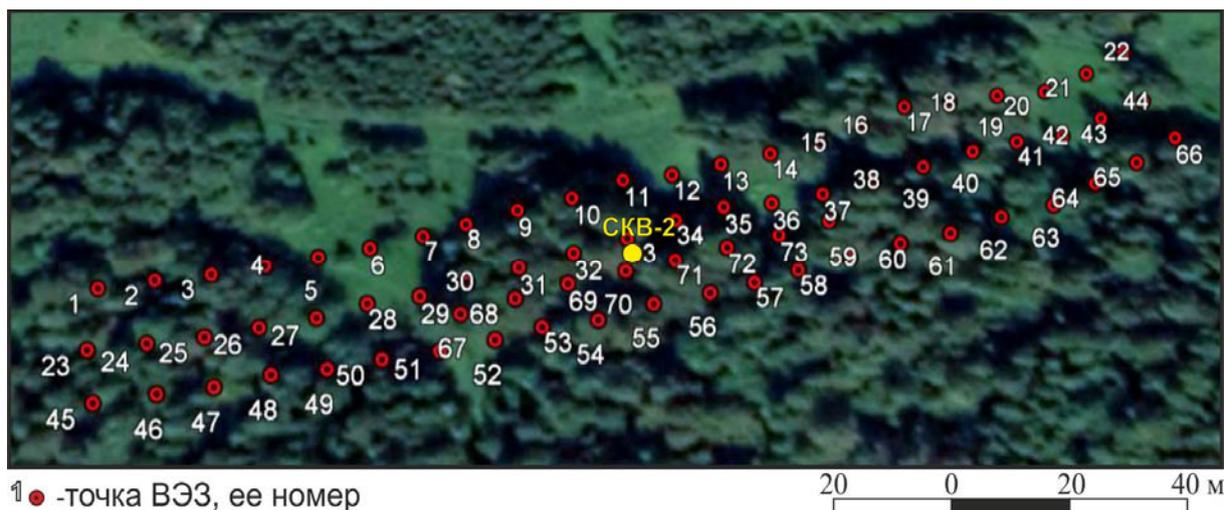
Ввиду асимметричности ослабленных зон и наличия их вертикального контакта с ненарушенными по-

родами на горизонтальных сечениях рассчитанной модели мы можем наблюдать вытянутость аномалий и инверсию свойств на периферии. Полученный на этапе качественной интерпретации контраст свойств позволяет оценить величину ожидаемого диапазона аномального проявления зон разуплотнения в пределах 5–8 %.

Принимая во внимание, что в естественных условиях изучаемые массивы горных пород, как правило, неоднородны, изменения электрических свойств зачастую могут быть связаны с вариациями инженерно-геологических условий, а не с наличием ослабленных зон. Кроме того, большое влияние на результаты измерений, расхождение которых сопоставимо с величиной аномального эффекта, оказывает наличие техногенных или геологических помех.

Учитывая вышесказанное, в условиях неоднородного состава отложений для повышения достоверности выделения ослабленных зон необходимо доизучение анизотропных свойств геологического разреза, обусловленных ослаблением физико-механических характеристик его элементов [21].

Выполнение натурных наблюдений проводилось на территории одного из месторождений нефти в районе проектируемого строительства инженерных сооружений. На основании результатов численного моделирования измерения выполнялись методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) в площадном варианте по нескольким азимутальным направлениям с детализацией в районе вскрытой ослабленной зоны ПК 56, 71, скв. 2 (рис. 3). Расстояние между профилями составляло в среднем 10 м, между пикетами – также 10 м. Измерения проводились с помощью цифрового аппаратурно-программного комплекса АМС-1. Глубина исследований составляла порядка 30 м.



1 ● -точка ВЭЗ, ее номер
Рис. 3. Обзорная схема участка исследования
Fig. 3. Overview scheme of the research area

В ходе визуального обследования при проведении полевых наблюдений было выявлено, что участок исследований осложнен наличием карстовых образований. На территории изучаемой площади выделяются

шесть карстовых воронок, плановая привязка которых представлена в табл. 2.

Полученные экспериментально значения кажущегося сопротивления исследуемого массива горных

пород изменяются в пределах 20–50 Ом·м. Верхняя часть разреза до эффективных глубин 2–7 м характеризуется наличием сравнительно низкоомных пород ($\rho_k=20\text{--}50$ Ом·м), по величине электрического сопротивления соответствующих породам глинистого состава (суглинки).

Таблица 2. Выделенные формы рельефа

Table 2. Selected landforms

Карстовые воронки Sinkholes	Пикет вертикального электрического зондирования Vertical electric sounding picket
1	10
2	21
3	30
4	35
5	47
6	43, 64–66

С глубиной поле закономерно меняется, характеризуясь общим увеличением сопротивления по площади и уменьшением содержания в составе пород глинистого материала, что указывает на появление в разрезе коренных пород. Морфология карстующихся отложений наиболее отчётливо прослеживается при трёхмерной визуализации области высоких сопротивлений при измерениях в ортогональном направлении (рис. 4), где выделяется ряд особенностей в районе пикетов 47К, 56К, 63К, связанных с изменением абсолютных отметок кровли пород.

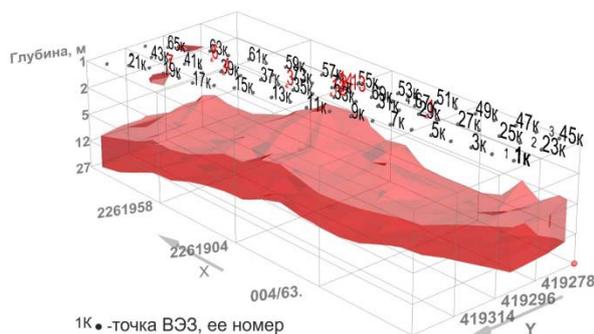


Рис. 4. Трёхмерная визуализация кровли высокоомных карстующихся пород

Fig. 4. Three-dimensional visualization of the roof of high-resistance karst rocks

В соответствии с полученными ранее результатами полевых и лабораторных исследований дисперсных грунтов для данного региона [4] определены диапазоны изменений электрических свойств пород исследуемого участка (табл. 3).

Определение количественных характеристик изучаемого объекта и корреляция выделяемых инженерно-геологических элементов выполнены на основании интерпретации параметрических зондирований вблизи существующих скважин. Анализ полученных данных позволил выделить шестислойный разрез, где:

- первый геоэлектрический горизонт сопротивлением 56 Ом·м характеризует отложения почвенно-растительного слоя и суглинки;

- обвальнo-карстовые отложения объединяются во второй, третий и четвертый горизонт. При этом второй слой представлен отложениями суглинки и зоной разуплотнения в них. Сопротивление слоя составляет 27 Ом·м. Третий горизонт характеризуется более высокими значениями сопротивлений (87 Ом·м) за счет увеличения содержания дресвы коренных пород (известняка, мергеля, гипса) до 20 %. Четвертый геоэлектрический горизонт, обладающий сопротивлением 70 Ом·м, залегает в интервале глубин от 4 до 8 м и соответствует отложениям суглинки с включениями дресвы и зон разуплотнения;
- пятый горизонт относительно повышенного сопротивления объединяет вскрытую карстовую полость, заполненную суглинком с дресвой и щебнем сульфатно-карбонатного состава, гипсом, а также незаполненную карстовую полость в интервале глубин 14,5–16,7 м. Сопротивление пятого горизонта составляет 233 Ом·м;
- опорный седьмой горизонт, залегающий с глубины порядка 17 м, на данной кривой представлен отложениями гипса с прослоями ангидрита. Сопротивление слоя составляет 1560 Ом·м, что свидетельствует об увеличении плотности коренных пород и уменьшении их трещиноватости с глубиной.

Таблица 3. Диапазон изменения удельных электрических сопротивлений литологических разностей

Table 3. Range of variation of specific electrical resistances of lithological differences

Наименование инженерно-геологических элементов Name of engineering-geological elements	Диапазон изменения электрических сопротивлений, Ом·м Range of variation of electrical resistances, Ohms·m
Суглинок полутвердый Semi-solid loam	20–40
Суглинок твердый Solid loam	30–50
Суглинок с включениями дресвы и щебня Loam with inclusions of gravel and crushed stone	60–100
Гипс трещиноватый Cracked gypsum	200–1000
Гипс (ангидрит, известняк, доломит) Gypsum (anhydrite, limestone, dolomite)	1000–10000

Геоэлектрическая модель среды, представленная на рис. 5, получена по результатам количественной интерпретации электрических зондирований и характеризуется сильной дифференциацией свойств исследуемой толщи.

Диапазон изменений физических свойств верхней части разреза указывает на преобладание в ней отложений глинистого состава. В данном интервале дисперсных грунтов зоны повышенного сопротивления связаны как с возможным наличием зон разуплотнения, так и с увеличением содержания включений дресвы, щебня карбонатных (сульфатных) пород или

песчаного материала. Наряду с этим низкоомные области в толще, залегающей ниже, имеют корреляцию

с массопереносом и увеличением содержания глинистого материала, влажности отложений.

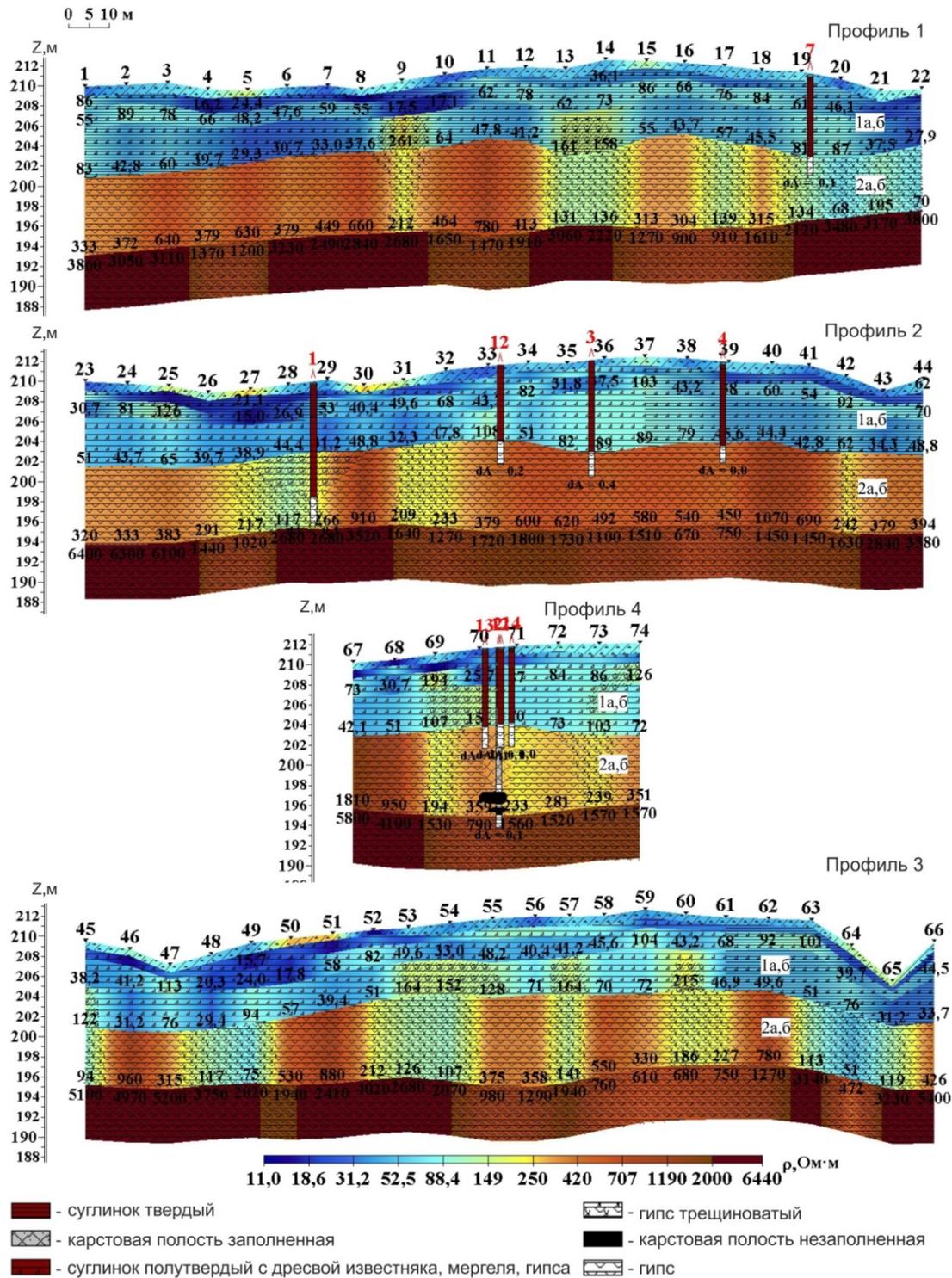


Рис. 5. Геоэлектрическая модель, построенная по результатам количественной интерпретации электрических зондирований

Fig. 5. Geoelectric model based on the results of quantitative interpretation of electrical soundings

Обвальнo-карстовые отложения объединяются во второй, третий и четвертый горизонты и представлены суглинком с включениями дресвы и щебня мергеля, гипса, известняка. Суглинки характеризуются изменением сопротивления от 30 до 60 Ом·м. Понижение со-

противлений суглинков до 11–20 Ом·м указывает на увеличение содержания глинистого материала, влажности отложений, возможное повышение минерализации, возможное засоление грунтов, а также разуплотнение пород. В районе ПК ВЭЗ 9, 13, 14, 25, 45, 53–55,

57, 60, 69, 70, 74 сопротивление толщи повышается до 120–260 Ом·м, что свидетельствует о наличии большого количества включений дресвы и щебня, а также о возможном включении глыбового материала.

В то же время кровля карстующихся сульфатных пород имеет вариации по вертикали с наибольшим изменением свойств в районе пикетов 9, 13, 19, 29, 42, 69, 49, 57, 63. На фоне высоких значений электрического сопротивления выделяются участки аномально повышенных значений УЭС, которые могут быть обусловлены карстовыми (незаполненными) полостями или присутствием более плотных пород сульфатно-карбонатного состава.

Следует обратить внимание на то, что в ряде случаев выделенных аномалий отсутствует чёткая корреляция между обнаруженными карстовыми полостями и изменением физических свойств среды. Это можно объяснить тем, что причиной аномальных эффектов

являются вариации литологического состава или морфологии пород. В то же время неблагоприятные сценарии развития карстовых процессов в первую очередь связаны с наличием зон трещиноватости. Как правило, данные зоны отмечаются увеличением глинистого материала в поровом пространстве сульфатно-карбонатных пород. При этом секущие трещины в совокупности с наземными и подземными карстовыми формами сопровождаются резкими изменениями физических свойств среды [11, 22].

На основании вышеизложенного в качестве дополнительного критерия выявления карстово-суффозионных процессов использован коэффициент анизотропии. Для этой цели были произведены расчёты пространственного распределения данного параметра, которые представлены в виде различных проекций относительно поверхностных форм рельефа (рис. 6, а, б).

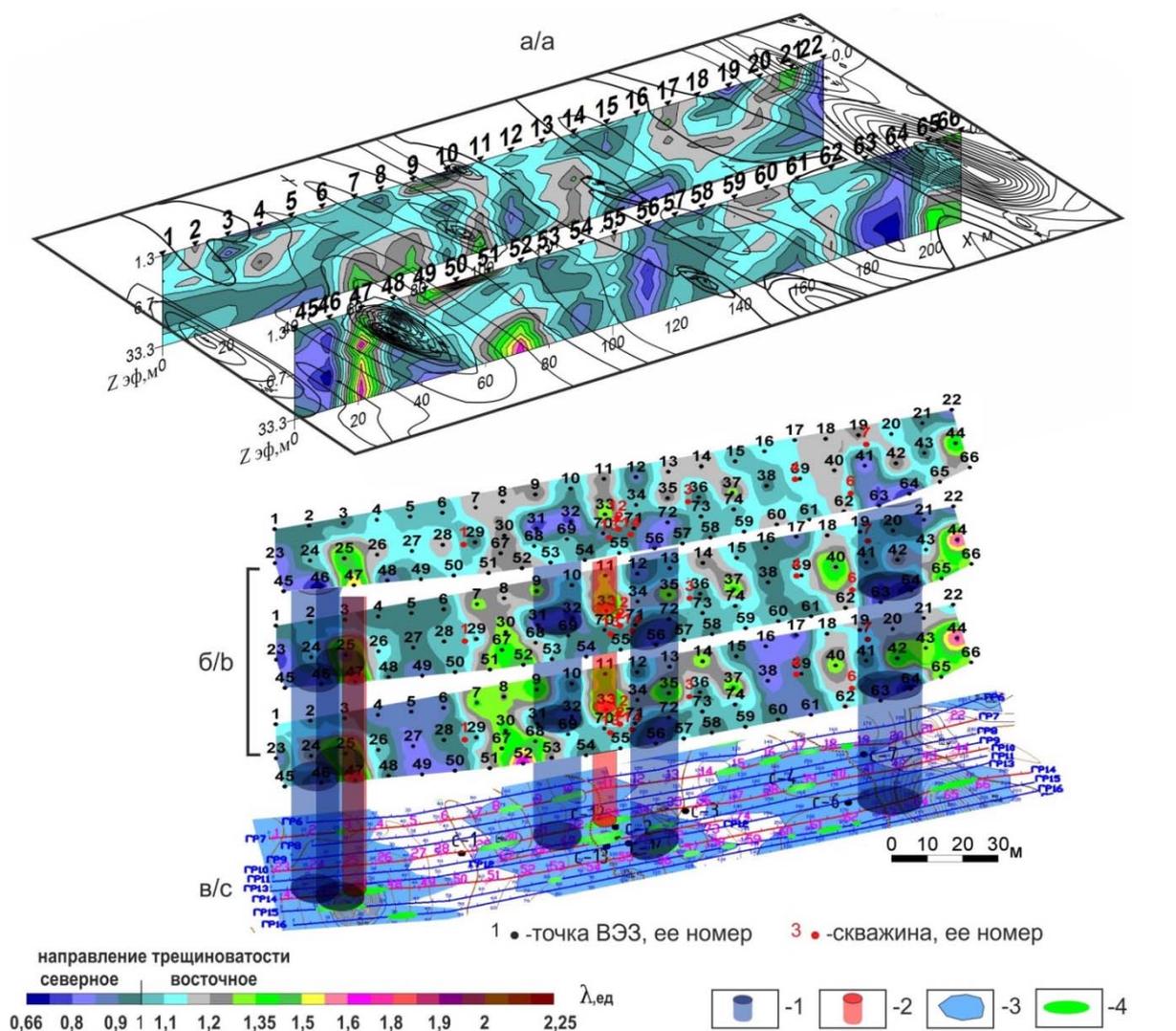


Рис. 6. Проекция отображения коэффициента анизотропии в различных плоскостях относительно поверхностных форм рельефа (а, б) и карта районирования карстово-суффозионной опасности (в) (1, 2 – области аномально низких и высоких значений коэффициента анизотропии; 3, 4 – зоны повышенной трещиноватости и разуплотнения пород)

Fig. 6. Projections of the anisotropy coefficient in various planes relative to surface relief forms (a, b) and the zoning map of karst-suffusion hazard (c) (1, 2 – areas of abnormally low and high values of the anisotropy coefficient; 3, 4 – zones of increased fracturing and decompression of rocks)

В ходе анализа анизотропных свойств выявлено, что диапазон изменений фоновых значений находится в интервале от 0,8 до 1,2 единиц. На отображаемых проекциях отчётливо прослеживаются закономерности аномального распределения коэффициента анизотропии.

Наименьшие значения коэффициента сосредоточены в центральной части и на периферии исследуемого массива пород. Выделенные области аномально пониженных значений указывают на преобладание трещиноватости в северном направлении. Кроме того, отмечается наличие локальных аномальных зон повышенной анизотропии на различных эффективных глубинах.

Комплексный анализ геофизических данных и результатов заверочного бурения позволил выполнить районирование и оконтурить потенциальные области для развития опасных карстово-суффозионных процессов (рис. 6, в). Конфигурация выделенных зон разуплотнения в совокупности с площадным изменением электрических и анизотропных свойств карстующихся отложений свидетельствует о преобладании зон трещиноватости субмеридионального направления, связанных с нарушением сплошности пород. Необходимо подчеркнуть, что вскрытые полости имеют корреляцию с местоположением аномальных зон анизотропии, сопровождающихся инверсией «знака», то есть наличием трещиноватости в двух направлениях. Дан-

ный факт указывает на возможность использования комплексных параметров для осуществления прогнозных оценок и ранжирования зон риска.

Заключение

Таким образом, в результате проведённых исследований рассмотрен подход для оценки и районирования карстологической опасности и активности суффозионных процессов на территориях, подверженных риску их возникновения. Основные принципы, рассмотренные выше, базируются на численном моделировании электрических характеристик в трёхмерных неоднородных средах и натуральных наблюдениях, выполняемых по нескольким азимутальным наблюдениям. Полученные данные указывают на принципиальную возможность выделения ослабленных зон и могут быть использованы как для теоретических расчётов прогнозируемых провалов, так и для выбора защитных мероприятий по укреплению пород или проектных решений [23].

Авторы выражают благодарность коллективу ООО НИИППИД «Недра» за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгаров А.Г., Меховников А.Г., Зайчикова Г.А. Геофизические методы при инженерно-геологических изысканиях на объектах гражданского и промышленного строительства (на примере г. Уфы) // Картоажник. – 2021. – № 5 (311). – С. 52–61.
2. Хоменко В.П., Криночкина О.К. Карстово-суффозионно-обвальное провалообразование и оценка его опасности для зданий и сооружений // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 1. – С. 20–29.
3. Special issue on geoelectrical monitoring Foreward / R. Supper, J. Chambers, P. Tsourlos, J.H. Kim // Near Surface Geophysics. – 2014. – № 12 (1). – P. 1–3.
4. Geophysical techniques for monitoring carbonate karstic rocks / M. Guerriero, L. Capozzoli, G.D. Martino, V. Giampaolo, E. Rizzo, F. Canora, F. Sdao // Italian Journal of Engineering Geology and Environment. – 2019. – October. – P. 59–65.
5. Оценка карстовой опасности с применением геофизических методов в условиях складчатой зоны (на примере окрестностей г. Кентау, Казахстан) / Е.В. Дробинина, С.В. Щербakov, Д.Р. Золотарев и др. // Известия Уральского государственного горного университета. – 2022. – № 1 (65). – С. 28–45.
6. Капустин В.В., Истратов В.А., Бобачев А.А. Возможности комплекса методов скважинной сейсмоакустики и электрометрии при оценке закарстованности и суффозионной неустойчивости грунтов на застроенных территориях // Инженерные изыскания. – 2013. – № 5. – С. 72–77.
7. Татаркин А.В. Оценка системы «фундамент – грунтовое основание» // Геотехника. – 2019. – Т. XI. – № 3. – С. 52–62.
8. Аникеев А.В. Изучение карстово-суффозионных провалов на моделях из термопластических материалов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2008. – № 5. – С. 420–435.
9. Gołębiowski T., Jarońska E. Application of GPR and ERT methods for recognizing of gypsum deposits in urban areas // Acta Geophysica. – 2019. – October. – P. 12–28.
10. ERT-based investigation of a sinkhole in Greene County, Missouri / S.T. Kidanu, E.V. Torgashov, A.V. Varnavina, N.L. Anderson // AIMS Geosciences. – 2016. – V. 2. – P. 99–115.
11. Опыт геофизических исследований карста в Крыму / Г.Н. Амеличев, Г.В. Самохин, С.В. Токарев и др. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 292–303.
12. Application of geophysical methods in the study of karst / S. Vyzhva, V. Onyshchuk, I. Onyshchuk, M. Reva, O. Shabaturova // Conference proceedings, geoinformatics: Theoretical and applied aspects. – Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2020. – P. 1–5.
13. Methodological principles of geophysical studies of karst dangerous territories / S. Vyzhva, V. Onyshchuk, M. Reva, O. Shabaturova // Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology. – 2021. – V. 1 (92). – P. 24–34.
14. Multimethod geophysical investigation in karst areas: case studies from Silesia, Poland / I. Stan-Kłeczek, J. Pierwoła, A. Marciniak, K. Sutkowska, R. Tomaszewska // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2022. – V. 81. – P. 6–8.
15. Application of electrical resistivity method in steeply dipping karst terrane / M. Myat, A. Wamweya, O. Kovin, N. Anderson, J. Robison // Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst (GSP 183): Proceedings of 11th multidisciplinary Conference. – Tallahassee: American Society of Civil Engineers, 2008. – P. 91–97.
16. Моделирование проявления карстово-суффозионных провалов методом сопротивлений / В.А. Шевнин, П.К. Кастьяннос, К.В. Кривошея, А.М. Павлова, А.А. Рыжов, А.А. Бобачев // Инженерная геофизика-2013: X международная научно-практическая конференция и выставка. – Геленджик, 2013. – С. 1–10.
17. Татаркин А.В., Гилева М.И., Филимончиков А.А. К вопросу определения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов в лабораторных условиях // Вестник Пермского университета. Геология. – 2014. – № 1 (22). – С. 44–48.
18. Програма трехмерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации (наземный, скважинный и акваторный варианты) ZONDRES3D // Zond-geo.com. 2022. URL: <http://zond-geo.com/zfiles/Zondres3d.zip> (дата обращения 23.05.2022).
19. Матвеев Б.К., Татаркин А.В. Геофизические исследования карста и подземных вод в НУБ «Предуралье» // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Конференция. –

- Пермь: Пермский государственный университет, 1997. – С. 178–179.
20. Геоэлектрические исследования процессов подготовки провалов грунта / Е.Н. Волкова, П.А. Казначеев, А.Н. Камшилин, В.В. Попов // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. – № 3. – С. 64–79.
21. Yeboah A., Whitman D. Geophysical flow analysis of anisotropy in a karst system: cases of snapper creek municipal well field, Miami // South Central Section GSA 48th Annual Meeting. – Fayetteville, 2014. – P. 77–79.
22. Шувалов В.М. Комплексное применение методов геофизики при решении задач по оценке местоположения, глубины залегания и формы локальных неоднородностей // Вестник Пермского университета. Геология. – 2012. – № 4 (17). – С. 63–67.
23. Хоменко В.П., Крашенинников В.С. Противокарстовая защита и признаки подготовки провалообразования // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 9. – С. 54–58.

Поступила 06.06.2022 г.
Прошла рецензирование 10.07.2022 г.

Информация об авторах

Татаркин А.В., доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета.

Красильников П.А., доктор геолого-минералогических наук, декан геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета.

Мещерякова О.Ю., кандидат технических наук, заместитель декана геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета.

Ермаков Д.В., начальник отдела охраны окружающей среды ООО НИПППД «Недра».

UDC 550.837:551.435.8:624.13.3

TO ASSESS THE DANGER OF KARST-SUFFUSION PROCESSES

Alexey V. Tatarkin¹,
vsto08@mail.ru

Pavel A. Krasilnikov¹,
geolnauka@gmail.com

Olga Yu. Meshcheryakova¹,
olgam.psu@gmail.com

Denis V. Ermakov²,
ermakov@nedra.perm.ru

¹ Perm State National Research University,
15, Bukirev street, Perm, 614068, Russia.

² LLC NIPPPD «Nedra»,
13a, L. Shatrov street, Perm, 614064, Russia.

The relevance of the research is caused by the search for predictive parameters and criteria for changes in the electrical properties of rocks associated with the dissolution and removal of rock particles in areas with the spread of deposits of carbonate-sulfate composition. In addition, the use of geophysical methods with a one-sided approach to restoring the physical properties of a geological section does not always give an unambiguous assessment of the results obtained. The above facts indicate the need to search for and evaluate the possibilities of integrated solutions to increase the unambiguity of the interpretation of geophysical data and the reliability of forecast calculations. **The purpose** of the work consists in the development of scientific and methodological foundations of a method for assessing the danger of karst-suffusion processes.

The object is represented by an array of rocks in the area of karst-suffusion processes.

The methods used to achieve this goal are based on numerical modeling of electric fields, field observations by vertical electric sounding in various azimuthal directions, combined analysis of geological and geophysical data and laboratory studies. The AMS-1 hardware complex and the ZondRes3D, «Zond» software systems were used as tools. The study of electrical resistivity on rock samples was carried out using an original technique without disturbing the structure and humidity of monoliths.

The research results reflect a comprehensive analysis of geological and geophysical data, including theoretical calculations in three-dimensional inhomogeneous media, field experiment and verification of the forecast model. Based on a priori information and laboratory data on the properties of the medium, a physico-geological model with weakened areas associated with the removal and dissolution of rocks was compiled. The revealed patterns are the basis for zoning on geometrization of potential areas of development of dangerous karst-suffusion processes and further selection of protective measures to strengthen the rock mass or design solutions.

Key words:

hazardous processes, modeling, karst, suffusion, physical properties, electrical exploration.

The research was supported by the Perm Research and Education Centre for Rational Use of Subsoil, 2021.

REFERENCES

- Bolgarov A.G., Mekhovnikov A.G., Zaichikova G.A. Geophysical methods for engineering and geological surveys at civil and industrial construction sites (on the example of Ufa). *Logger*, 2021, № 5 (311), pp. 52–61. In Rus.
- Khomenko V.P., Krinochkina O.K. Karst-suffusion-collapse sinkhole formation and assessment its dangers for buildings and structures. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2022, no. 1, pp. 20–29. In Rus.
- Supper R., Chambers J., Tsourlos P., Kim J.H. Special issue on geoelectrical monitoring Foreword. *Near Surface Geophysics*, 2014, no. 12 (1), pp. 1–3.
- Guerriero M., Capozzoli L., Martino G.D., Giampaolo V., Rizzo E., Canora F., Sdao F. Geophysical techniques for monitoring carbonate karstic rocks. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2019, October, pp. 59–65.
- Drobinina E.V., Shcherbakov S.V., Zolotarev D.R. Assessment of karst hazard using geophysical methods in the conditions of a folded zone (on the example of the environs of Kentau, Kazakhstan). *Izvestiya Ural State Mining University*, 2022, no. 1 (65), pp. 28–45. In Rus.
- Kapustin V.V., Istratov V.A., Bobachev A.A. Possibilities of a complex of methods of borehole seismoacoustics and electrometry in assessing the karstiness and suffusion instability of soils in built-up areas. *Engineering surveys*, 2013, no. 5, pp. 72–77.
- Tatarkin A.V. Evaluation of the system «foundation – ground foundation». *Geotechnics*, 2019, vol. XI, no. 3, pp. 52–62. In Rus.
- Anikeev A.V. Study of karst-suffusion dips on models made of thermoplastic materials. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2008, no. 5, pp. 420–435. In Rus.
- Gołębiowski T., Jarońska E. Application of GPR and ERT methods for recognizing of gypsum deposits in urban areas. *Acta Geophysica*, 2019, October, pp. 12–28.
- Kidanu S.T., Torgashov E.V., Varnavina A.V., Anderson N.L. ERT-based investigation of a sinkhole in Greene County, Missouri. *AIMS Geosciences*, 2016, vol. 2, pp. 99–115.
- Amelichev G.N., Samokhin G.V., Tokarev S.V. Experience of geophysical research of karst in Crimea. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 292–303. In Rus.
- Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Shabaturova O. Application of geophysical methods in the study of karst. *Conference proceedings, geoinformatics: Theoretical and applied aspects*. Kyiv, Taras Shevchenko National University of Kyiv Publ., 2020. pp. 1–5.
- Vyzhva S., Onyshchuk V., Reva M., Shabaturova O. Methodological principles of geophysical studies of karst dangerous territories.

- Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2021, vol. 1 (92), pp. 24–34.
14. Stan-Kłeczek L., Pierwola J., Marciniak A., Sutkowska K., Tomaszewska R. Multimethod geophysical investigation in karst areas: case studies from Silesia, Poland. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, vol. 81, pp. 6–8.
 15. Myat M., Wamweya A., Kovin O., Anderson N., Robison J. Application of electrical resistivity method in steeply dipping karst terrane. *Proceedings of 11th multidisciplinary Conference. Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst (GSP 183)*. Tallahassee, American Society of Civil Engineers, 2008. pp. 91–97.
 16. Shevchin V.A., Castellanos P.K., Krivosheya K.V., Pavlova A.M., Ryzhov A.A., Bobachev A.A. Modelirovanie proyavleniya karstovo-suffuzionnykh provalov metodom soprotivleniy [Modeling of karst-suffusion dips by the method of resistances]. *Inzhenernaya geofizika-2013. X mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya i vystavka [X International scientific and practical conference and exhibition. Engineering Geophysics-2013]*. Gelandzhik, 2013. pp. 1–10.
 17. Tatarkin A.V., Gileva M.I., Filimonchikov A.A. On the issue of determining the electrical resistivity of dispersed soils in laboratory conditions. *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2014, no. 1 (22), pp. 44–48. In Rus.
 18. *Program of three-dimensional interpretation of the data of the method of resistances and induced polarization (ground, borehole and aquator variants) ZONDRES3D*. Available at: <http://zond-geo.com/zfiles/Zondres3d.zip> (accessed 23 May 2022).
 19. Matveev B.K., Tatarkin A.V. Geofizicheskie issledovaniya karsta i podzemnykh vod v NUB «Preduralie» [Geophysical studies of the karst and groundwater in the NUB «Preduralie»]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala. Konferentsiya [Conference. Geology and minerals of the Western Urals]*. Perm, Perm State University, 1997. pp. 178–179.
 20. Volkova E.N., Kaznacheev P.A., Kamshilin A.N., Popov V.V. Geoelectric studies of the processes of preparation of sinkholes. *Geophysical research*, 2013, vol. 14, no. 3, pp. 64–79. In Rus.
 21. Yeboah A., Whitman D. Geophysical flow analysis of anisotropy in a karst system: cases of snapper creek municipal well field, Miami. *South Central Section GSA 48th Annual Meeting*. Fayetteville, 2014. pp. 77–79.
 22. Shuvalov V.M. Complex application of geophysics methods in solving problems of estimating the location, depth and shape of local inhomogeneities. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2012, no. 4 (17), pp. 63–67. In Rus.
 23. Khomenko V.P., Krashenninnikov V.S. Anti-karst protection and signs of failure formation preparation. *Industrial and civil construction*, 2020, no. 9, pp. 54–58. In Rus.

Received: 6 June 2022.
Reviewed: 10 July 2022.

Information about the authors

Alexey V. Tatarkin, Dr. Sc., professor, Perm State National Research University.

Pavel A. Krasilnikov, Dr. S., Dean of the Geological Faculty, Perm State National Research University.

Olga Yu. Meshcheryakova, Cand. Sc., Deputy Dean of the Geological Faculty, Perm State National Research University.

Denis V. Ermakov, Head of the Environmental Protection Department, LLC NIPPPD «Nedra».