

УДК 550.370, 556

ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПОДТАПЛИВАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ ОДНОГО ИЗ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ Г. ИРКУТСКА

Шкиря Михаил Сергеевич¹,
mshkiria@geo.istu.edu

Ланкин Юрий Константинович²,
yur-lankin@yandex.ru

Терешкин Станислав Андреевич¹,
stereshkin@geo.istu.edu

Лазурченко Антон Витальевич¹,
alazurchenko@geo.istu.edu

Давыденко Юрий Александрович¹,
dya@geo.istu.edu

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² АО «Росгео», Россия, 664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а.

Актуальность исследования заключается в необходимости оценки проблемы подтопления одного из жилых районов г. Иркутска Иркутской области. Подтопления урбанизированных территорий в большинстве своем имеют сезонный характер. Определение условий залегания водоупорных и хорошо проницаемых пород, а также выявление участков возможного скопления грунтовых вод методом электротомографии позволяет разработать мероприятия по ликвидации ущерба, вызванного процессом подтопления.

Цель: Оценка геолого-гидрогеологических условий развития процесса подтопления, оказывающего негативное воздействие на жилую застройку.

Объекты: монолиты коренных пород, характеризующиеся высокими сопротивлениями и являющиеся практически водоупорами; проницаемые зоны на поверхности земли, через которые происходит фильтрация атмосферных осадков и питание грунтовых вод; области, где возможно образование подвешенных вод и развитие за счет них процесса подтопления.

Методы: наземные геофизические исследования методом электротомографии; двумерная и трехмерная инверсия данных электротомографии и их интерпретация с учетом инженерно-геологических данных бурения.

В результате наземных геофизических исследований установлено, что склон, на котором расположена оцениваемая территория, является древним оползевым цирком, где нарушено естественное состояние толщи пород. Геофизическими исследованиями выявлены хорошо проницаемые зоны на поверхности земли, через которые происходит фильтрация атмосферных осадков и питание грунтовых вод. По данным электротомографии выделены подзоны: сильного подтопления с уровнем подземных вод близким к поверхности земли; умеренного подтопления с глубиной залегания подземных вод от 0,3 до 2 м и слабого подтопления с глубиной залегания уровня подземных вод от 2,0 до 5,0 м.

Ключевые слова:

подтопление, электротомография, удельное электрическое сопротивление, грунтовые воды, зона аэрации, верховодка.

Введение

В статье рассматривается применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий для оценки условий развития негативного процесса подтопления и разработки мероприятий по ликвидации вызванных им проявлений или по уменьшению его активности в одном из жилых районов г. Иркутска. Естественная причина подтопления – это в первую очередь сезонные колебания выпадения атмосферных осадков [1–3]. Подтопление – явление, которое в последние 20–30 лет стало наиболее распространенным в центральных районах города и некоторых других населенных пунктов [4]. Периодическое или постоянное подтопление жилой застройки в г. Иркутске происходит во время интенсивного выпадения осадков за счет нерациональной планировки рельефа в ее пределах, неэффективной системы водоотведения атмосферных осадков или ее отсутствия. Особенно это касается старых районов города. Гидрогеологический процесс, протекающий в условиях увеличивающегося техногенного воздействия, приводит к постепенному расширению подтопления застроенной территории. Подтопление застроенной территории города происходит при участии дополнительного техногенного питания [5]. В одном из старых районов города в конце 2021 г. проведены специальные инженерно-геологические изыскания с применением наземных геофизических исследований методом электротомографии. Электротомографические измерения выполняются, как правило, в тех случаях, когда требуется изучение геологических разрезов со слож-

ным строением [6–8]. Рассматриваемый район характеризуется неоднородным геолого-гидрогеологическим строением зоны аэрации. Здесь терригенная толща юрских отложений состоит из пластов хорошо проницаемых песчаников, разделенных тремя водоупорными пластами аргиллитов. В песчаниках на водоупорных аргиллитах сформирована серия грунтовых горизонтов – верховодок, которые, разгружаясь по склонам, подтапливают жилую застройку. Часть верховодок имеет незначительные размеры и временный характер, многие же существуют постоянно. Кроме этого, в пониженных участках рельефа, где отсутствуют коммуникации водоотведения, атмосферные осадки фильтруются в зону аэрации, что обуславливает насыщение грунтов вблизи поверхности земли, образуются подвешенные грунтовые воды, что провоцирует развитие процесса подтопления.

Наземные геофизические исследования методом электротомографии являются одним из ведущих методов при

малоглубинных исследованиях, позволяющих достаточно детально расчленить изучаемый разрез по удельному электрическому сопротивлению ($УЭС$) пород [9–11]. Работы этим методом проводились для оценки геолого-гидрогеологических условий развития процесса подтопления. Их задачей являлось расчленение геологического разреза до глубины 30–40 м по сопротивлению пород, что дало возможность определения условий залегания водоупорных и хорошо проницаемых пород, оконтуривание участков инфильтрации атмосферных осадков (питания «верховодок»), выявление участков возможного скопления грунтовых вод на водоупорных породах и участков образования подвешенных грунтовых вод.

Методика работ

Исследуемый участок находится в предместье Радищева г. Иркутска Иркутской области (рис. 1). Объем полевых работ составил 4 погонных километра.

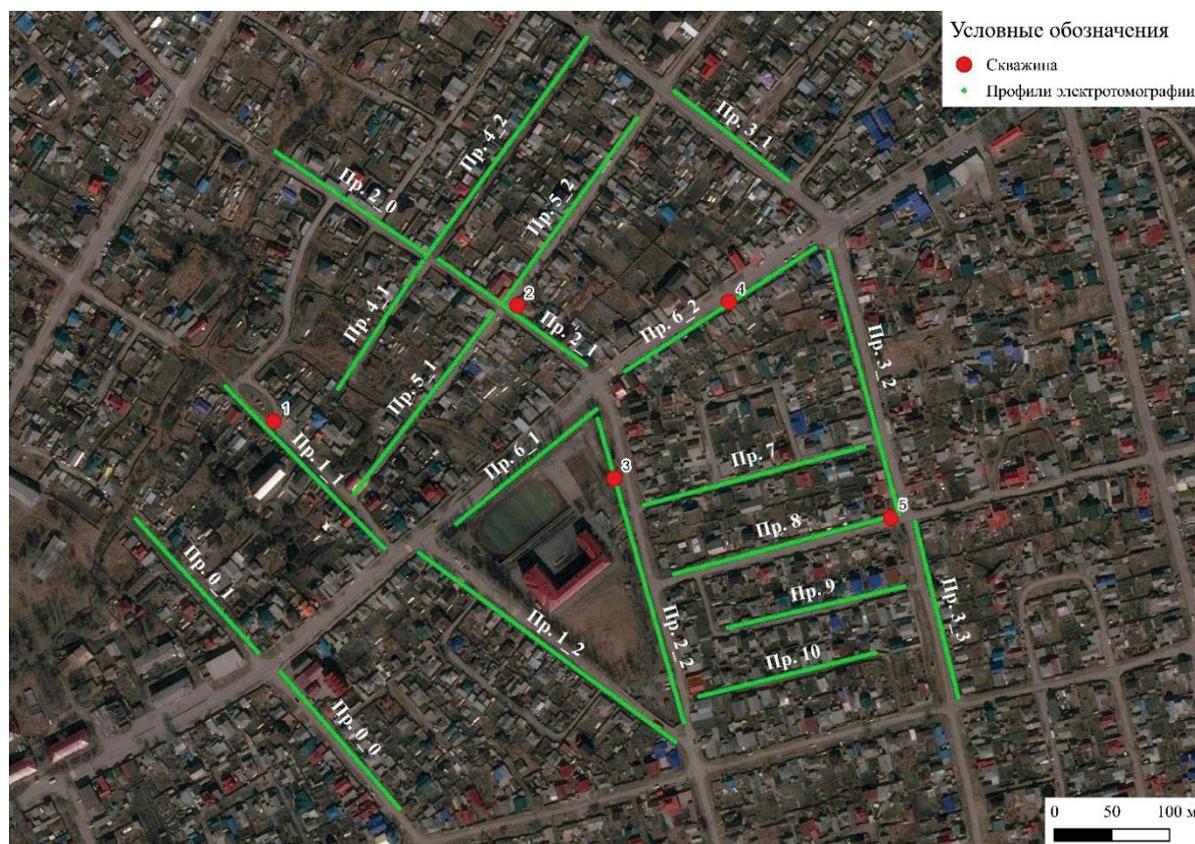


Рис. 1. Схема расположения профилей электротомографии

Fig. 1. Map of electrical resistivity tomography survey lines

Детальное строение верхней части разреза до глубин 30–40 м было получено по данным электротомографии, выполненной аппаратурой «Скала-64» [12].

Электротомография – это электроразведочный комплекс, включающий в себя как методику полевых работ, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Электротомография основана на применении многоэлектродных электроразведочных кос, подключаемых к аппаратуре, способной коммутировать токовые и измерительные электроды на

произвольные выводы косы [13]. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же фиксированных на профиле электродов. Данная методика приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Такой подход позволяет, с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой,

а с другой – применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии [14, 15].

Удельное электрическое сопротивление 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 для поиска и локализации проницаемых зон [16–19].

При проведении электротомографии использовалась установка Шлюмберже [20]. Она обладает одинако-

вой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам, являясь компромиссом между установками Веннера и дипольной, глубиной на 10 % большей, чем у Веннера и средним горизонтальным покрытием [21]. Расстояние между электродами было принято в 2,5 м. Выбор расстояния между электродами позволяет регулировать глубину исследования и влиять на разрешающую способность [22]. Выходное напряжение составляло 200 В. Продолжительность импульса тока – 100 мс, паузы – 20 мс. Схема используемой установки электротомографии представлена на рис. 2.

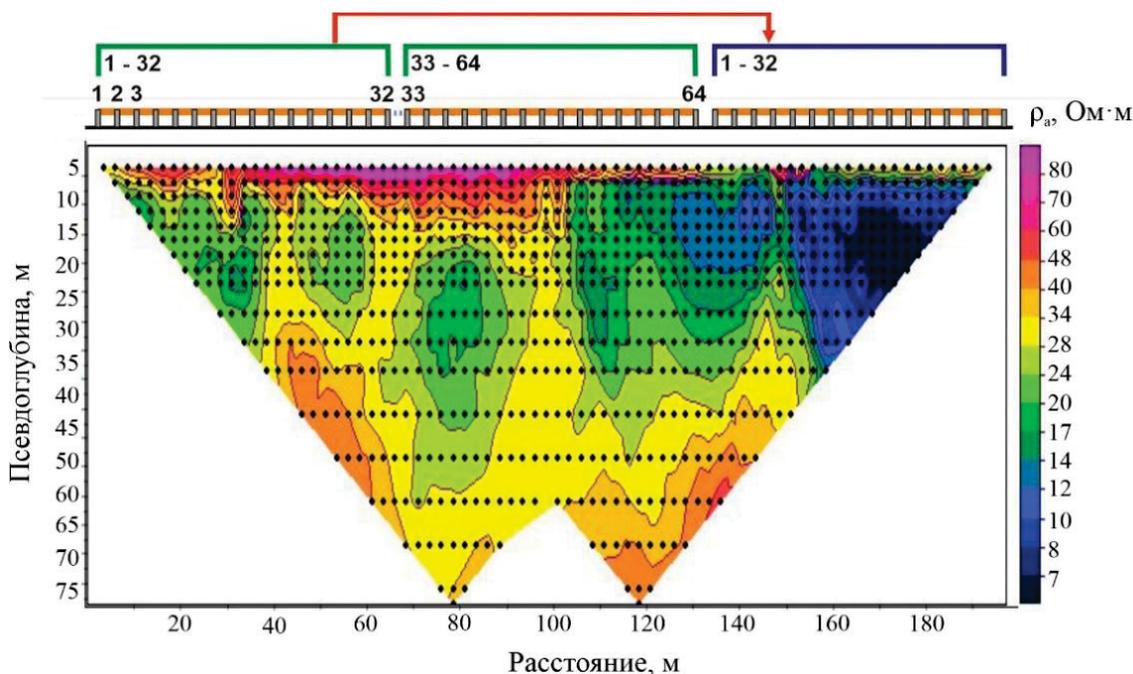


Рис. 2. Схема установки электротомографии

Fig. 2. Diagram of the electrical resistivity tomography installation

Работы были осложнены плохими условиями заземления электродов. Половина территории работ заасфальтирована и забетонирована, также 25 % ее осложнена каменистыми насыпями. По возможности заземления проводились в трещины на асфальте. На участках пересечения дорог выполнить заземление было невозможно, вследствие чего некоторые профили построены с разрывами.

Результаты и их обсуждение

Инверсия данных выполнялась в программах ZondRes2d и ZondRes3d, которые предназначены для двумерной и трехмерной интерпретации данных электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации [23]. Качество и достоверность результатов работы алгоритма автоматической двумерной инверсии зависело и от качества полевых данных, и от соответствия изучаемой геологической среды двумерной геоэлектрической модели, и от полноты использования априорной информации [24]. Среднеквадратическое отклонение между наблюдаемыми и модельными данными составило 3 %. По результатам двумерной инверсии, выполненной в про-

грамме ZondRes2d, были отстроены разрезы по всем одиннадцати профилям.

На рис. 3 представлены разрезы УЭС по профилям 2_1 и 6_2. Техногенный слой, мощность которого изменяется в пределах от 0,5 до 5 м, прослежен на всех профилях. УЭС данного слоя в пределах 70–100 Ом·м. На разрезах УЭС кровля водоупорного слоя хорошо прослеживается (выделена пунктирной линией). В данных условиях водоупорные среднеюрские породы удалось проследить на глубину до 40 м. В районе скважин 2 и 4 подтопление происходит за счет формирования «подвешенных» вод. Интервал сезонного подтопления меняется в течение года в периоды осадконакопления и таяния снега. Интервал подтопления включает в себя современные элюваально-делювиальные отложения и среднеюрские коренные породы. Первые сложены дресвой и щебнем, супесями с включениями песка. Коренные породы представлены переслаивающимися песчаниками и алевролитами.

В геологическом отношении участок работ достаточно сложный. На профилях электротомографии отчетливо наблюдается блоковое строение.

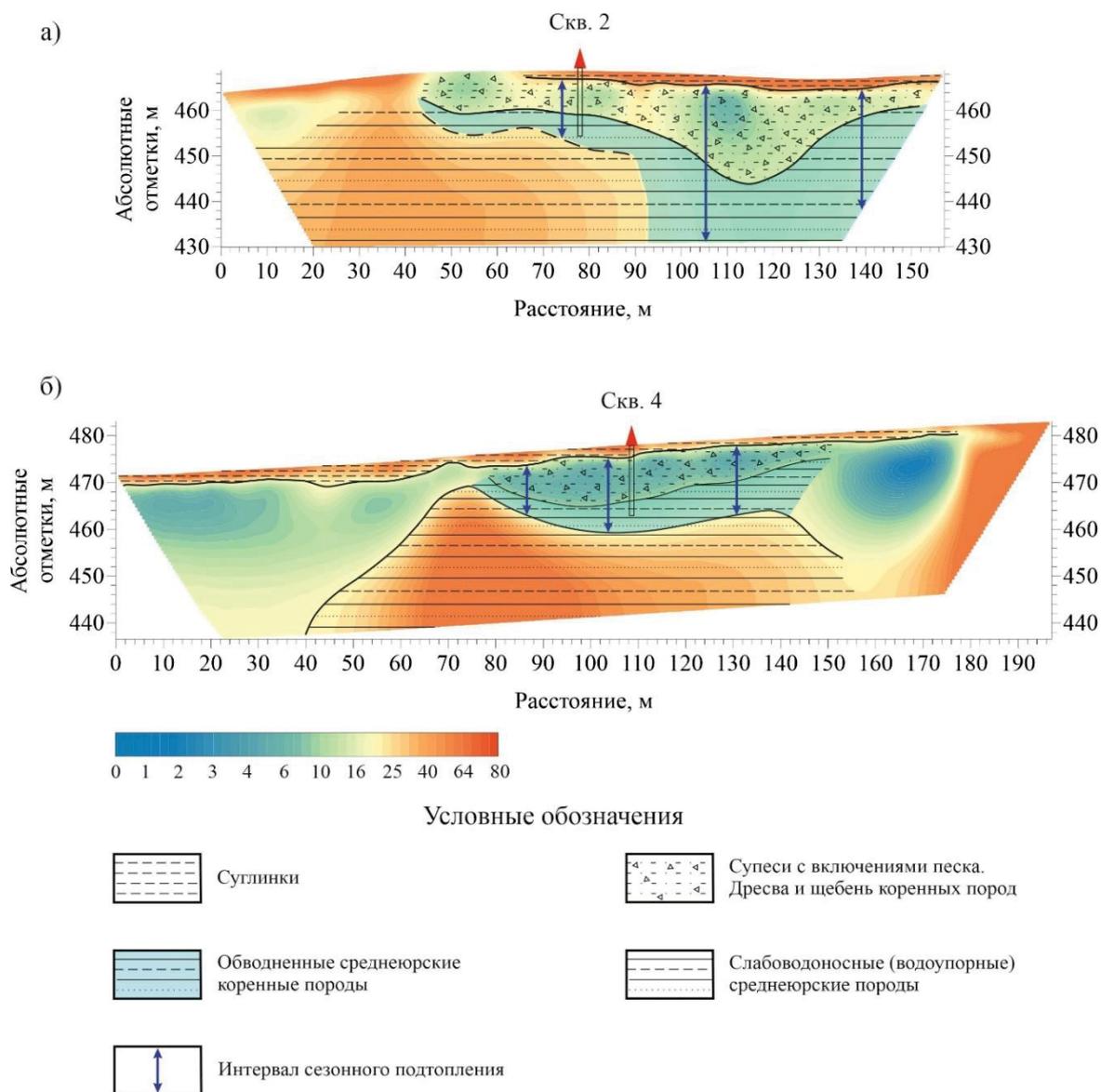


Рис. 3. Разрезы УЭС: а) профиль 2_1; б) профиль 6_2
 Fig. 3. Sections of electrical resistivity: a) section 2_1; b) section 6_2

Для анализа полученных материалов использовалась программа трехмерной визуализации многокомпонентных данных «Voxler». На рис. 4 бирюзовым цветом показаны отдельные, не связанные между собой, проницаемые зоны, сложенные среднеюрскими коренными породами. Они характеризуются пониженными значениями УЭС в пределах от 8 до 15 Ом. Предполагаемая кровля водоупорного горизонта (коричневая) характеризуется значениями УЭС от 40 до 60 Ом. Предполагается, что мощность водоупорных среднеюрских пород, более 10 м.

Уверенное построение достоверной трехмерной модели изучаемой территории по результатам двумерной инверсии данных электротомографии зависит от нескольких причин. Одна из них – это соответствие изучаемой геологической среды двумерной геоэлектрической модели. В алгоритме двумерной инверсии данных электротомографии реализованы практические приемы подбора удельных электриче-

ских сопротивлений блоков модели на основе сходства электрических полей «подбираемой» модели и исследуемой среды [25–27].

По результатам интерпретации данных электротомографии было задано пять мест для бурения инженерно-геологических скважин глубиной 9,0–20,0 м. В них после бурения проведены опытно-фильтрационные работы.

В результате выполненных инженерно-геологических изысканий с использованием наземных геофизических исследований установлено, что склон, на котором расположена оцениваемая территория, является древним оползневым цирком, где нарушено естественное состояние толщи пород кудинской свиты средней юры. Оползневые деформации нивелированы в рельефе и перекрыты покровными делювиальными образованиями. Инженерно-геологическими скважинами не вскрыты коренные песчаники в естественном состоянии и пласты водоупорных аргиллитов, по кровле которых может быть

разгрузка верховодок, что наблюдается на сопредельных территориях. Оползневые деформации наглядно прослежены по данным наземных геофизических исследований (рис. 5). Монолиты коренных пород, характеризующиеся высокими сопротивлениями до

60 Ом, разделены на отдельные блоки, которые имеют различные абсолютные отметки кровли. Они в виде ступеней залегают параллельно оползневому склону, по которому происходило смещение пород.

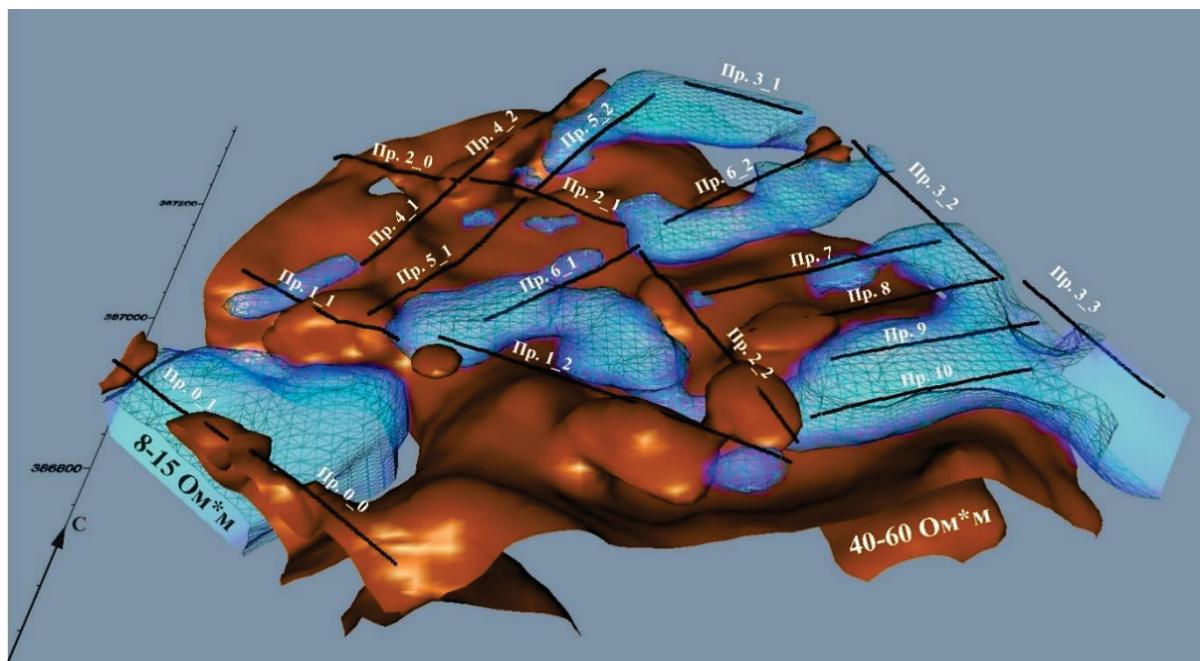


Рис. 4. Модель расположения линз верховодки и водоупорного горизонта

Fig. 4. Model of the location of the perched water lenses and the aquiclude

Результаты опытно-фильтрационных работ показали, что водовмещающие породы рассматриваемого участка недр имеют более высокие фильтрационные показатели, чем те же породы зоны аэрации с верховодками в ненарушенных оползневыми деформациями условиях. Это свидетельствует о том, что массив пород оползневого склона раздроблен, а перекрывающие древние делювиальные отложения проницаемы. Данные опытно-фильтрационных исследований приведены в таблице.

Таблица. Данные опытно-фильтрационных исследований

Table. Data of pilot seepage studies

№ скв. Borewell no.	Дебит Water discharge		Понижение, м Well drawdown, m	Удельный дебит, л/с Specific capacity, l/s	Кэф. фильтр., м/сут Permeability coefficient, m/day	Водопроницаемость, м ² /сут Transmissibility, m ² /day
	л/с l/s	м ³ /сут m ³ /day				
1	0,28	24,2	1,41	0,2	5,2	26
2	0,25	21,5	1,1	0,23	5,6	27
3	0,22	18,8	0,6	0,22	15,6	36
4	0,23	19,4	1,03	0,22	8,9	33
5	0,22	18,8	0,7	0,22	16	24

Фильтрационные показатели водовмещающих пород по коэффициенту водопроницаемости относительно однородны. Наиболее высокие коэффициенты

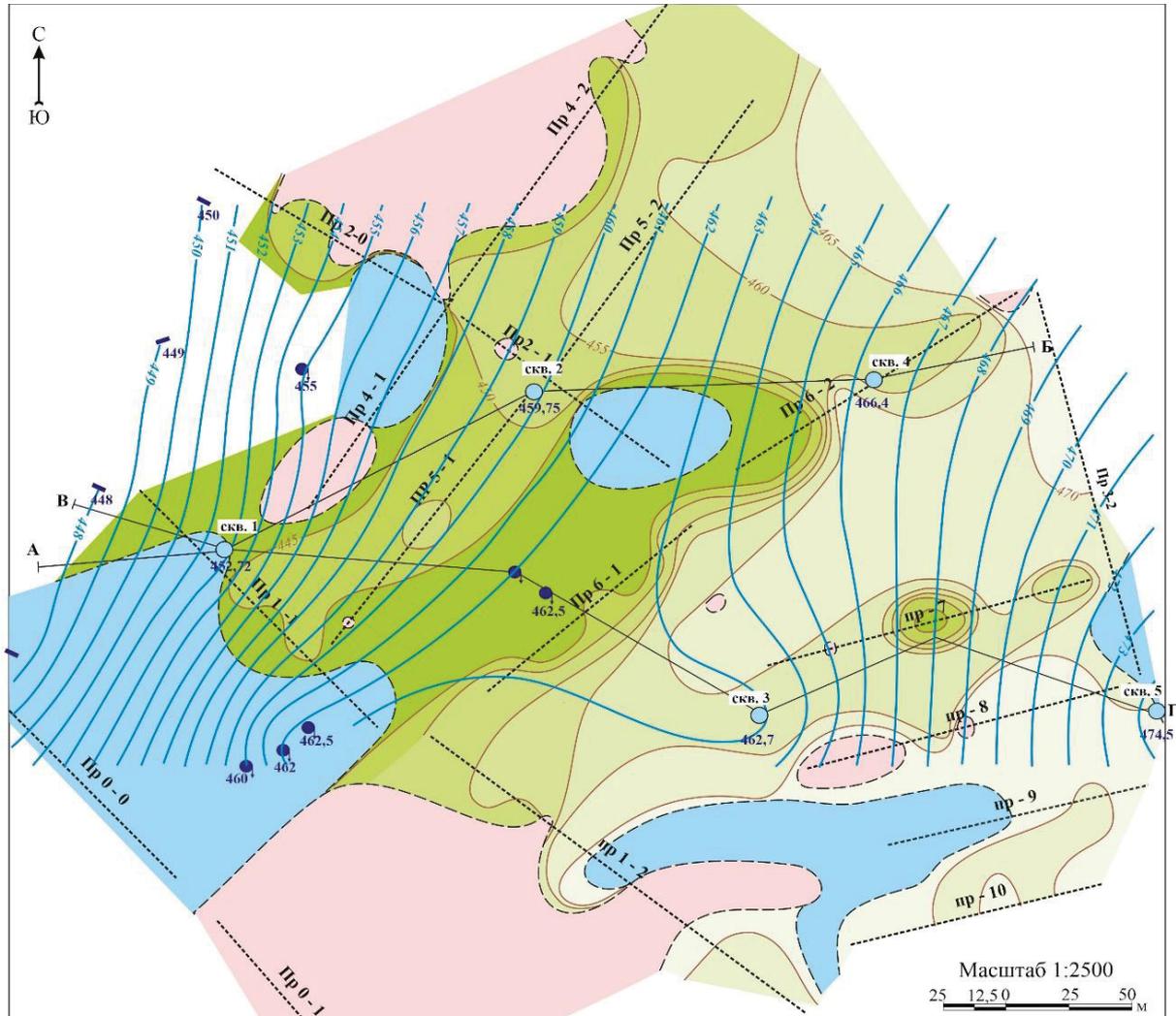
фильтрации отмечаются по скважинам 3 и 5. Скважина 3 расположена в линейной впадине, которая может быть приурочена к древнему рву оседания оползневых деформаций, то же самое касается и скважины 5.

По химическому составу вскрытые подземные воды либо хлоридно-гидрокарбонатные, либо гидрокарбонатно-хлоридные с минерализацией 0,49–0,74 г/л. Это не свойственный состав грунтовых вод юрских отложений. В естественных условиях хлориды практически отсутствуют, а минерализация подземных вод значительно ниже. Присутствие хлоридов в воде можно связать только с хорошей фильтрацией воды с поверхности земли, за счет противогололедных мероприятий, которые проводятся в холодный период года. Тем более практически до начала декабря преобладала теплая погода и часто наблюдалось снеготаяние. Это значит, что атмосферные осадки в теплый период года хорошо фильтруются в зону аэрации, где сформирован грунтовый горизонт, который залегают выше основного водоносного горизонта зоны полного водонасыщения в отложениях кудинской свиты средней юры.

По полученным данным установлено, что на рассматриваемой площади в районе улиц Радищева, Кирпичная и Ивана Кочубея расположена зона развития негативного процесса подтопления. В ее пределах выделяются следующие подзоны: сильного подтопления с уровнем подземных вод близким к поверхности земли; умеренного подтопления с глубиной залегания подземных вод от 0,3 до 2 м; слабого подтопле-

ния с глубиной залегания уровня подземных вод от 2,0 до 5,0 м. Кроме этого, за пределами зоны постоянного подтопления наблюдаются явления подтопления, имеющего временный характер. Они развиваются преимущественно в зоне аэрации. В целом вся

площадь разделяется на следующие территории (рис. 6): с развитием постоянного подтопления за счет неглубокого залегания подземных вод (I) и с развитием подтопления в зоне аэрации (II).



Условные обозначения

- | | |
|--|--|
| Шкала абсолютных отметок залегания кровли пород (слабопроницаемых-водоупорных) с высокими сопротивлениями, м | Зона залегания пород с наименьшими сопротивлениями на всю глубину исследований |
| | Зона залегания пород с максимальными сопротивлениями на всю глубину исследований |
| Изогипсы абсолютных отметок подошвы пород с низкими сопротивлениями пород | Зондировочная скважина, ее номер и абсолютная отметка уровня воды |
| Геофизический профиль и его номер | Родниковая разгрузка подземных вод и абсолютная отметка уровня воды |
| Морфоствор на ручье с постоянным стоком и абсолютная отметка уровня воды | Линия геолого-гидрогеологического разреза |
| Гидроизогипсы уровня подземных вод по состоянию на начало декабря 2021 г. | |

Рис. 5. Схематическая карта гидрогеологических условий предместья Радищева
 Fig. 5. Contour map of the hydrogeological conditions in Radishchev outskirts

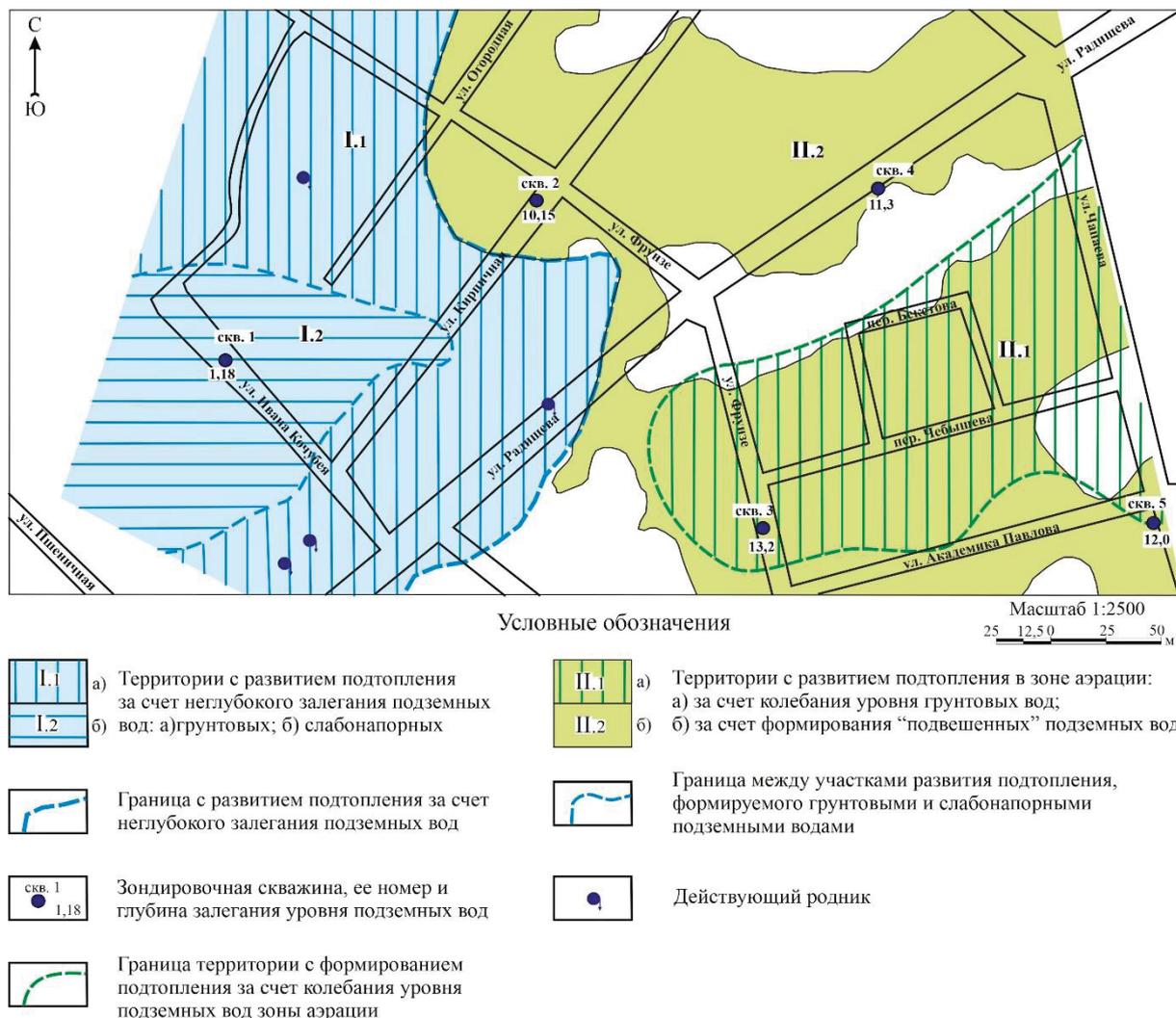


Рис. 6. Схема условий подтопления территории: с развитием постоянного подтопления за счет неглубокого залегания подземных вод (I) и с развитием подтопления в зоне аэрации (II).

Fig. 6. Plan of the settings for groundwater flooding of the territory: The increase of permanent flooding due to shallow groundwater occurrence (I) and the increase of flooding in the aeration zone (II).

По результатам бурения сильно выветрелые коренные породы в виде песчаника вскрыты скважинами 3, 4, 5 на глубине 11,0–13,5 м и скважиной 1 на глубине 6 м. Они перекрыты древними делювиальными образованиями, представленными супесью песчаной с прослойками песка, суглинка, включениями дресвы, щебня алевролита и песчаника. Сверху залегают современные делювиальные отложения, представленные преимущественно тяжелым суглинком. Мощность этих образований изменяется от 2 до 8 м. В целом же отдельные верховодки во время бурения скважин не вскрыты.

Территории с развитием подтопления за счет неглубокого залегания подземных вод разделяются на зоны с грунтовыми (I1) и напорными подземными водами (I2).

I1. Зона подтопления за счет грунтовых вод характеризуется естественным залеганием уровня на глубине от 0 до 5 м. Она примыкает к впадине в кровле водоупорных пород, которая расположена между улицами Радищева и Кирпичная. В ней концентриру-

ется подземный сток со всего оползневого цирка. Впадина является как бы аккумулятором ресурсов подземных вод, который служит источником питания грунтовых вод территории, испытывающей подтопление.

I2. Зона подтопления за счет слабонапорных подземных вод располагается ниже по склону. Здесь сверху преимущественно залегают слабопроницаемые (водоупорные) делювиальные суглинки, подошва которых расположена ниже уровня подземных вод. Местный напор обусловлен гидростатическим напором, сформированным в рядом расположенной впадине.

Для ликвидации подтопления на территориях с неглубоким залеганием подземных вод наиболее эффективным может быть только горизонтальный дренаж.

Развитие подтопления в зоне аэрации происходит за счет колебания уровня грунтовых вод (II1) и формирования «подвешенных» подземных вод (II2).

II1. Детально режим колебания уровня верховодок в зоне аэрации изучался по контрольно-наблюдательной

сети скважин на ТБО «Александровский». Амплитуда его изменения достигала, а часто и превышала 10 м. Очевидно, что такая же ситуация имеет место и в районе ул. Чебышева. В конце летнего периода 2021 г. после длительных осадков здесь оказались подтоплены подвалы на глубине 2,5–3,0 м. По результатам выполненных работ на начало декабря уровень находился на глубине 10–12 м. В районе ул. Чебышева расположена впадина в кровле водоупорных (высокоомных) пород, где концентрируется сток атмосферных осадков. Водоупорные породы вскрыты скважиной 5 на ул. Чапаева на глубине 13,5 м, мощностью 6,5 м. Водопиток в скважину из них отсутствовал, сверху залегал грунтовый горизонт мощностью 1,5 м. По результатам химического анализа воды по скважинам 3 и 5, между которыми расположена ул. Чебышева, состав воды оказался гидрокарбонатно-хлоридным с минерализацией 0,45–0,74 г/л. В летний период, во время развития подтопления, состав воды был чисто гидрокарбонатным. Хлор практически отсутствовал. Это может свидетельствовать только о том, что хлориды попали в подземные воды с поверхности земли после противогололедной обработки дорог, когда грунт еще достаточно не промерз. Таким образом, атмосферные осадки свободно могут пополнять грунтовые воды, в значительной степени повышая уровень хлора.

II2. Подтопление за счет формирования «подвешенных» подземных вод имеет временный характер и происходит на слабопроницаемых отложениях при отсутствии или нерациональной системе водоотведения атмосферных осадков. Скважинами вскрыты техногенные грунты мощностью от 0,8 до 2,3 м и делювиальные суглинки мощностью от 1 до 4 м. В замкнутых понижениях рельефа в техногенных грунтах и суглинках могут концентрироваться атмосферные осадки, подтапливая жилую застройку. Время подтопления обычно соответствует времени фильтрации воды через грунт, в котором происходит подтопление.

Для ликвидации процесса подтопления необходима организация стока атмосферных осадков. Требуется исключать концентрацию дождевых и талых вод в пониженных формах земной поверхности. Отведение

осадков с крыш необходимо по водостокам в городскую систему водоотведения.

В целом важное значение в питании очагов подтопления оказывают подземные коммуникации, через которые атмосферные осадки способны беспрепятственно поступать в зону аэрации. Такие случаи имеют достаточное распространение.

Заключение

В процессе проведенных инженерно-геологических изысканий установлено, что естественное геологическое строение оцениваемого участка недр в предместье Радищева г. Иркутска нарушено древними оползневыми деформациями. На склоне пади Пшеничная наземными геофизическими исследованиями выявлен оползневый цирк. Монолиты коренных пород, характеризующиеся высокими сопротивлениями и являющиеся практически водоупорами, разделены на отдельные блоки, которые имеют различные абсолютные отметки кровли. Подземный сток, формируемый атмосферными осадками, концентрируется в межблоковых впадинах и опущенных блоках оползневого цирка, провоцируя проявление негативного процесса подтопления. Геофизическими исследованиями выявлены хорошо проницаемые зоны на поверхности земли, через которые происходит фильтрация атмосферных осадков и питание грунтовых вод. Кроме этого, определены участки, где возможно образование подвешенных вод и развитие за счет них процесса подтопления.

По результатам выполненных работ на основании наземных геофизических исследований и бурения зондировочных инженерно-геологических скважин выполнено районирование площади изысканий по условиям развития подтопления, оценен ущерб населению, разработаны мероприятия по ликвидации этого негативного процесса.

Применение метода электротомографии позволило весьма эффективно оценить геолого-гидрогеологические условия подтопления жилой застройки предместья Радищева г. Иркутска. По результатам только бурения это было бы невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири // *Науки о Земле и недропользование*. – 2021. – Т. 44. – № 1 (74). – С. 73–84. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84.
2. Аузина Л.И., Ланкин Ю.К., Вахромеев А.Г. *Опытно-фильтрационные исследования. Основные виды работ. Методы обработки*. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2016. – 120 с.
3. Лоншаков Г.С., Аузина Л.И. Оценка ведущих факторов эволюции подземной гидросферы урбанизированных территории (на примере Г. Иркутска) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 50–59.
4. Поспелова И.Ю., Семигановский Б.В. Проблемы затопления г. Иркутск // *Водные ресурсы – основа устойчивого развития поселений Сибири и Арктики в XXI веке: Сборник докладов XXI Международной научно-практической конференции*. – Тюмень, 22 марта 2019. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 243–249.
5. Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Подтопление Иркутска грунтовыми водами // *География и природные ресурсы*. – 2011. – № 2. – С. 54–62.
6. Модин И.Н., Большаков Д.К., Бомкин С.В., Скобелев А.Д., Баранчук К.И., Ефремов К.Д., Пелевин А.А., Репьев А.С. Построение объемной модели верхней части геологической среды по данным электротомографии для решения инженерно-геологических задач // *Геомодель 2015: 17-я научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа*. – Геленджик, 07–10 сентября 2015. – Геленджик: European Association of Geoscientists & Engineers, 2015. – V. 2015. – ср-448-00019. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412239>
7. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications // *First Break*. – 1996. – № 14. – P. 275–283.
8. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system / A. Watlet, K. van Noten, T. Lecocq, J. Chambers, P. Meldrum, O. Francis, M. van Camp, O. Kaufmann // *Near Surface Geoscience: 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – Greece, September 2014. – Athens: European Association of Geoscientists

- & Engineers, 2014. – V. 2014. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142008>.
9. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview // 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. – Brazil, October 2001. – Salvador: European Association of Geoscientists & Engineers, 2001. – cp-217-00044. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.217.044>.
10. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography // Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – France, September 2012. – Paris: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. – cp-306-00184. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143359>.
11. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography / M. Karaoulis, W. Bakx, P. Doornenba, P. Kruiver, S. Rijpkema // 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Netherlands, September 2019. – The Hague: European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. – V. 2019. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902439>.
12. GEODEVICE. URL: <https://geodevice.ru/main/electric/units/skala64> (дата обращения 21.06.2022).
13. Стойкин Т.А., Балков Е.В., Манштейн Ю.А. Опыт применения электротомографии для решения инженерно-геологических задач // Инженерная и рудная геофизика 2011: 7-я научно-практическая конференция и выставка. – М., апрель 2011. – М.: European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – cp-236-00034. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403895>.
14. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, В.А. Шевнин // Разведочная геофизика. Обзор. – М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1996. – Вып. 2. – 50 с.
15. Бортникова С.П., Ельцов И.Н., Борисенко Д.А. Возможности малоглубинной электротомографии при решении инженерно-геологических задач // Инженерная геофизика 2013: 9-я международная конференция и выставка. – Геленджик, 22–26 апреля 2013. – Геленджик: EAGE Publications BV, 2013. DOI: [10.3997/2214-4609.20142499](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142499).
16. Fetter C.W. Applied hydrogeology. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001. – 615 p.
17. Санчаа А.М., Фаре 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: [10.25018/0236-1493-2019-10-090-105](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-090-105).
18. Investigating hillslope hydrology with electrical resistivity tomography / E. Gasperikova, R. Salve, D. Rempe, J. Peterson // 24th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – Texas, April 2011. – Forth Worth: European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – cp-247-00023. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.247.30>.
19. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography // EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering. – Indonesia, April 2018. – Yogyakarta: European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. – V. 2018. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800374>.
20. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
21. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 1. – С. 43–47.
22. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping // 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC. – Spain, June 2010. – Barcelona: European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. – cp-161-00478. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201401070>.
23. Zond Software. URL: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (дата обращения 21.06.2022).
24. Опыт применения электротомографии в геофизике / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн и др. // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
25. Loke M.H., Barker R.D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections // Geophysics. – 1995. – V. 60. – P. 1682–1690.
26. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – № 44. – P. 131–152.
27. Loke M.H., Acworth I., Dahlin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys // Explor. Geophys. – 2003. – V. 34. – P. 182–187.

Поступила 11.07.2022 г.

Прошла рецензирование 13.09.2022 г.

Информация об авторах

Шкиря М.С., младший научный сотрудник департамента геофизики «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Ланкин Ю.К., руководитель Иркутского территориального центра государственного мониторинга геологической среды АО «Росгео».

Терешкин С.А., младший научный сотрудник департамента геофизики «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Лазурченко А.В., студент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

Давыденко Ю.А., кандидат технических наук, директор по маркетингу и проектному обучению «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 550.370, 556

APPLYING GROUND GEOPHYSICAL PROSPECTING USING THE METHOD OF ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY AS PART OF ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEYS OF A FLOODED AREA IN ONE OF THE RESIDENTIAL AREAS OF IRKUTSK

Mikhail S. Shkiria¹,
mshkiria@geo.istu.edu

Yury K. Lankin²,
yur-lankin@yandex.ru

Stanislav A. Tereshkin¹,
stereshkin@geo.istu.edu

Anton V. Lazurchenko¹,
alazurchenko@geo.istu.edu

Yury A. Davydenko¹,
dya@geo.istu.edu

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

² JSC «Rosgeo»,
9a, Clara Zetkin street, Irkutsk, 664039, Russia.

The relevance of the study is caused by the necessity to assess the problem of flooding of one of the residential areas in Irkutsk, Irkutsk region. The flooding of urban areas is mostly seasonal. Identifying the conditions of aquicludes and well-permeable rocks, as well as, determining areas of possible groundwater accumulation using the method of electrical resistivity tomography makes it possible to develop measures to eliminate the damage caused by flooding.

The objective. The work was carried out using the method of electrical resistivity tomography to assess the geological and hydrogeological conditions for flooding development, which has negative impact on residential development.

Objects: bedrock monoliths characterized by high electrical resistance and being practically aquicludes; permeable zones on the land surface, which provide precipitation filtration and ground-water supply through them; areas, where the formation of vadose waters that cause the development of groundwater flooding is possible.

Methods: ground geophysical prospecting using the method of electrical resistivity tomography; two-dimensional and three-dimensional inversion of electrical resistivity tomography data and its interpretation with regard to geotechnical drilling data.

As a result of ground geophysical prospecting, it was established that the slope on which the assessed territory is located is an ancient landslide cirque, where the natural state of the rock mass is disturbed. Geophysical prospecting has revealed well-permeable zones on the land surface, which provide precipitation filtration and ground-water supply through them. According to electrical resistivity tomography, subzones were identified: severe flooding with groundwater level close to the land surface; moderate flooding with a groundwater level depth of 0,3 to 2 meters and weak flooding with a groundwater level depth of 2,0 to 5,0 meters.

Key words:

groundwater flooding, electrical resistivity tomography, electrical resistivity, groundwater, vadose zone, perched water.

REFERENCES

1. Auzina L.I. Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities. *Earth sciences and subsoil use*, 2021, vol. 44, no. 1, pp. 73–84. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>.
2. Auzina L.I., Lankin Yu.K., Vakhromeev A.G. *Opytno-filtratsionnye issledovaniya. Osnovnye vidy rabot. Metody obrabotki* [Pilot seepage studies. Main types of work. Processing methods]. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University Publ., 2016. 120 p.
3. Lonshakov G.S. Evaluation of determining factors of underground hydrosphere evolution within urban areas (on the example of Irkutsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 50–59.
4. Pospelova I.Yu., Semiganovsky B.V. Problemy zatopeniya g Irkutsk [Problems of flooding in Irkutsk]. *Vodnye resursy – osnova ustoychivogo razvitiia poseleniy Sibiri i Arktiki v XXI veke. Sbornik dokladov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Water resources – the basis for sustainable development of settlements in Siberia and the Arctic in the XXI century. Conference proceedings of the XXI International scientific and practical conference]. Tyumen, March 22, 2019. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2019. pp. 243–249.
5. Shenkman B.M., Sholokhov P.A., Shenkman I.B. Underflooding of Irkutsk caused by phreatic rise. *Geography and Natural Resources*, 2011, vol. 2, pp. 54–62. In Rus.
6. Modin I.N., Bolshakov D.K., Bomkin S.V., Skobelev A.D., Baranchuk K.I., Efremov K.D., Pelevin A.A., Repiev A.S. Construction of three-dimensional model top of the geological environment according electrical resistivity tomography for geotechnical problems. *Geomodel 2015 – 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development*. Gelendzhik, September 2015. Vol. 2015, cp-448-00019. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412239>.
7. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 1996, no. 14, pp. 275–283.
8. Watlet A., Van Noten K., Lecocq T., Chambers J., Meldrum P., Francis O., Van Camp M., Kaufmann O. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system. *Near Surface Geoscience 2014. 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Greece, September 2014. Athens, European Association of Geoscientists & Engineers,

2014. Vol. 2014, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142008>.
9. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview. *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Brazil, October 2001. Salvador, European Association of Geoscientists & Engineers. cp-217-00044. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.217.044>.
 10. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography. *Near Surface Geoscience 2012. 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. France, September 2012. Paris, European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. cp-306-00184. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143359>.
 11. Karaoulis M., Bakx W., Doornenba P., Kruiver P., Rijpkema S. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography. *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Netherlands, September 2019. The Hague, European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. Vol. 2019, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902439>.
 12. *Geodevice* [Geo device]. Available at: <https://geodevice.ru/main/electric/units/skala64> (accessed 21 June 2022).
 13. Stoikin T.A., Balkov E.V., Manstein Yu.A. Experience in the use of electrical resistivity tomography for solving engineering-geological problems. *7th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics*. Moscow, April 2011. Moscow, European Association of Geoscientists & Engineers cp-236-00034. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403895>.
 14. Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnev V.A. Mno-goelektrodneye elektricheskie zondirovaniya v usloviyakh gorizont-alno-neodnorodnykh sred [Multielectrode electric sounding in conditions of horizontally inhomogeneous media]. *Razvedochnaya geofizika. Obzor* [Exploration Geophysics. Review]. Moscow, CJSC Geoinformmark, 1996. Iss. 2, 50 p.
 15. Bortnikova S.P., Eltsov I.N., Borisenko D.A. Vozmozhnosti maloglobulinoy elektrotomografii pri reshenii inzhenerno-geologicheskikh zadach [Possibilities of shallow electrical resistivity tomography in solving engineering-geological problems]. *In-zhenernaya geofizika 2013. 9 Mezhdunarodnaya konferentsiya i vystavka* [Engineering geophysics 2013: 9th international conference and exhibition, Gelendzhik, April 22–26, 2013. Gelendzhik, EAGE Publications BV, 2013. DOI: [10.3997/2214-4609.20142499](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142499).
 16. Fetter C.W. *Applied hydrogeology*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2001. 615 p.
 17. Sanchaa A.M., Fage A.N., Shemelina O.V. Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region. *Mining Inf. Anal. Bull.*, 2019, no. 10, pp. 90–105. In Rus. DOI: [10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105).
 18. Gasperikova E., Salve R., Rempe D., Peterson J. Investigating hillslope hydrology with electrical resistivity tomography. *24th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Texas, April 2011. Forth Worth, European Association of Geoscientists & Engineers. cp-247-00023. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.247.30>.
 19. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography. *EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering*. Indonesia, April 2018. Yogyakarta, European Association of Geoscientists & Engineers. Vol. 2018, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800374>.
 20. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnev V.A. ERT as the method of resistivity and induced polarization. Instruments and systems of exploration. *Geofizika*, 2006, no. 2, pp. 14–17. In Rus.
 21. Bobachev A.A., Modin I.N. Electrical resistivity tomography with standard electrical prospecting complexes. *Prospect and protection of mineral resources*, 2008, no. 1, pp. 43–47. In Rus.
 22. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping. *72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. Spain, June 2010. Barcelona, European Association of Geoscientists & Engineers. cp-161-00478. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201401070>.
 23. *Zond Software*. Available at: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (accessed 21 June 2022).
 24. Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A. Experience in the use of electrical resistivity tomography in geophysics. *Geophysics*, 2012, no. 6, pp. 54–63. In Rus.
 25. Loke M.H., Barker R.D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 1995, no. 60, pp. 1682–1690.
 26. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, no. 44, pp. 131–152.
 27. Loke M.H., Acworth I., Dahlin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Explor. Geophys.*, 2003, vol. 34, pp. 182–187.

Received: 11 July 2022.

Reviewed 13 September 2022.

Information about the authors

Mikhail S. Shkiriya, junior researcher, Irkutsk National Research Technical University.

Yury K. Lankin, head of the Irkutsk Territorial Center for State Monitoring of Geological Environment, JSC «Rosgeo».

Stanislav A. Tereshkin, junior researcher, Irkutsk National Research Technical University.

Anton V. Lazurchenko, student, Irkutsk National Research Technical University.

Yury A. Davydenko, Cand. Sc., Marketing and Project Education Director, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University.