ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Физико-геологические модели прибрежных территорий по данным петрофизического и электротомографического моделирования

В.В.Глазунов[1], **Жень Ицян**[1], **Д.И.Зеликман**[1]✉, **В.А.Шевнин**[2]

[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Глазунов В.В., Жень Ицян, Зеликман Д.И., Шевнин В.А. Физико-геологические модели прибрежных территорий по данным петрофизического и электротомографического моделирования // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 107-118. EDN NBFPDU

Аннотация

Возможности гидроакустических методов, широко применяемых при проведении инженерно-геофизических исследований в акваториях, ограничены при наличии газонасыщенных придонных отложений. В неблагоприятных условиях целесообразно применять электроразведочные методы. В статье рассмотрена эффективность современных электротомографических (ЭТ) технологий надводной и донной систем наблюдения для изучения геологических разрезов в прибрежных зонах акваторий. Синтезированы базовые геоэлектрические и электротомографические модели, позволяющие оценить влияние солености воды и литологического состава отложений на результаты морской электроразведки. Данные петрофизического моделирования показали, что наряду с воздействием минерализации поровой воды на соотношение значений удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов значительное влияние оказывает минеральный состав глинистых минералов. Влияние проявляется в виде смещения положения точки инверсии значений удельного электрического сопротивления песчано-глинистых грунтов при увеличении значений емкости катионного обмена, свойственных различным минералогическим типам глин. Результаты численного моделирования электротомографических разрезов с надводной и донной системами наблюдения показали, что донная измерительная система обеспечивает получение достоверной информации о геоэлектрическом строении разреза песчано-глинистых отложений, а на разрезах, полученных по данным ЭТ съемки на поверхности воды, наблюдаются искажения структуры геоэлектрического разреза и проявляются ложные аномалии. Установлено преимущество донной ЭТ для изучения геологического строения морских прибрежных территорий. Экспериментальные работы в акватории Лужской губы Финского залива подтвердили эффективность применения донной ЭТ для повышения достоверности межскважинной геологической интерполяции при построении сводных геолого-геофизических разрезов. Применение донной ЭТ обеспечило непрерывное прослеживание геоэлектрических границ, соответствующих различным литологическим разностям придонных песчано-глинистых отложений.

Ключевые слова

придонные отложения; донная электротомография; надводная электротомография; геоэлектрические модели; минерализация поровой воды; ионообменная емкость глин; геолого-электротомографические разрезы; межскважинная геологическая интерполяция

Поступила: 20.03.2025 ***Принята: 09.12.2025*** ***Онлайн: 16.02.2026*** ***Опубликована: 27.02.2026***

Введение

Современная геофизика успешно развивается в Санкт-Петербургском горном университете. Исследования, основанные на наблюдении геофизических полей, охватывают широкий круг задач, от изучения глубинного строения Земли [1, 2] до инженерных и археологических исследований [3, 4]. Ведется активная научно-исследовательская работа, направленная на совершенствование обработки геофизических данных [5-7] и решение актуальной задачи прогноза нефтегазоносности [8, 9].

В статье рассмотрены синтетические физико-геологические модели прибрежных песчано-глинистых отложений пресноводных и морских акваторий. На основании результатов моделирования дана оценка возможностей акваториальных электротомографических систем наблюдения в надводной и донной модификациях для изучения геологического строения этих отложений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 107-118
© В.В.Глазунов, Жень Ицян, Д.И.Зеликман, В.А.Шевнин, 2026

Проектирование строительства портовой инфраструктуры сопряжено с проведением инженерно-геологических изысканий и геоэкологических исследований в пределах прибрежных мелководных участков акваторий[1]. Основными задачами изысканий являются литологическое расчленение геологического разреза, определение кровли несущих грунтов и выявление геологических объектов, затрудняющих проведение дноуглубительных работ. Для решения этих задач широко используются морские геофизические технологии, применяемые для повышения детальности инженерно-геологических исследований и обоснования межскважинной интерполяции геологических данных, получаемых в результате бурения.

В настоящее время ведущая роль принадлежит гидроакустическим методам, к которым относятся сканирование дна локаторами бокового обзора и многолучевыми эхолотами, а также непрерывное сейсмическое профилирование для зондирования придонных отложений [10, 11]. Главным недостатком, ограничивающим возможность гидроакустики для полноценного изучения строения придонных отложений в прибрежных частях акватории, является наличие неблагоприятных факторов, затрудняющих изучение геологического разреза морских отложений на требуемую глубину. К ним относятся прежде всего формирование интенсивных кратных отражений, затрудняющих выделение полезных волн, и наличие экранирующего слоя донных газосодержащих илов [10].

Электроразведочные методы рекомендуется применять в качестве вспомогательных при низкой эффективности гидроакустических методов для изучения геологического строения и инженерно-геологических процессов, в том числе в зонах сплошного распространения газонасыщенных и мерзлых грунтов. Особенно широко электроразведка используется в комплексе с гидроакустикой для изучения субаквальной криолитозоны и пресноводных акваторий [12-14].

Наличие указанных ограничений сейсмоакустики определяет востребованность метода акваториальной электротомографии (ЭТ) в надводной (НЭТ) и донной (ДЭТ) модификациях [12]. Применение этих модификаций перспективно для повышения информативности морской геофизики для изучения геологического строения прибрежных зон и мелководья [15-17].

Геофизические исследования, включая акваториальную ЭТ, широко и достаточно успешно используются в рамках биологических исследований и картирования подводных ландшафтов для изучения геологического строения придонных отложений и подтопляемой территории [18, 19].

Перспективным направлением морской электроразведки является выявление субаквальных зон внедрения подземных пресных, минерализованных вод и участков загрязнения в прибрежных зонах [18-22]. К важным задачам относится локализация газонасыщенных донных осадков и придонных отложений [23-25]. Актуален мониторинг эволюции газопроявлений в прибрежных осадках с помощью ЭТ [25]. Применение электроразведки для инженерно-геологических изысканий в морских условиях осложнено высокой минерализацией поровых вод в морских отложениях, которая значительно изменяет геоэлектрическую структуру донных отложений [23, 26, 27]. Донная электротомография в последнее время активно и успешно применяется в подводной археологии [28-30]. В связи с этим оценка возможностей и адаптация электроразведочных технологий к морским условиям при проведении инженерно-геологических и экологических изысканий в прибрежной зоне являются актуальными задачами [31-33].

В статье приводятся результаты петрофизических исследований влияния солености воды на эффективность применения ЭТ для изучения геологического строения придонных отложений при надводной и донной системах наблюдений. Синтезированы базовые геоэлектрические модели водонасыщенных песчано-глинистых отложений мелководных акваторий. Выявлены и определены особенности влияния ионообменной емкости глинистых минералов (ЕКО) на удельное электрическое сопротивление (УЭС) дисперсных грунтов при изменении минерализации воды. Сформулированы условия успешного применения электротомографии при изучении геологического строения придонных отложений в прибрежной части акваторий.

[1] СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. М.: Минстрой России, 2021. 176 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Синтез геоэлектрических моделей отложений, формирующих геологическое строение прибрежной части акваторий

Породы, слагающие придонные отложения, характеризуются полным водонасыщением и обладают низкими значениями УЭС. Наряду с минеральным составом и водно-физическими свойствами доминирующее влияние на УЭС отложений оказывает минерализация воды, которая заполняет поровое пространство, а также проникает по трещинам и ослабленным зонам в монолитные горные породы [17, 24, 33].

Геоэлектрические модели синтезированы с помощью алгоритма А.А.Рыжова («Петрофизика»), реализованного в программе Петро.

В программе Петро сопротивление поровой влаги с учетом типа катионов и анионов, а также концентрация соли в воде рассчитываются по формуле

$$\sigma = |z_+ z_-| CF\left(V_c + V_a\right) e^{\left[\frac{-C}{|Z_+ Z_-| n \cdot 1000}\right]},$$

где σ – удельная электропроводность раствора, см/м; C – концентрация соли, моль/м^3; F – число Фарадея, Кл/моль; V_c, V_a – подвижность катионов и анионов растворенного вещества, м^2/(с·В); n – число гидратации, показывающее, сколько молей растворителя окружают i-й ион в растворе, моль/м^3; z_+, z_- – валентность катиона и аниона.

Гранулометрический состав грунта содержит частицы различных размеров. Для каждой фракции в модели задаются пористость и влажность, радиусы капилляров, величина m-Арчи и ЕКО (г/л). Величина ЕКО в граммах на литр отличается от широко используемого параметра ЕКО (мг-экв/100 г). Между этими параметрами принят коэффициент пересчета ЕКО (г/л) ≈ 0,3ЕКО (мг-экв/100 г).

Для крупнозернистой компоненты грунта ЕКО считается равной нулю. Проводимость грунта рассчитывается по формуле:

$$\sigma_n = \frac{2zFK_n}{r_2^2}\int_0^{r_2} r\left[U_c\left(C_c + C_{c0}\right)\exp\left(\frac{C_c + C_{c0}}{1000zN}\right) + U_a\left(C_c + C_{c0}\right)\exp\left(\frac{C_a + C_{a0}}{1000zN}\right)\right]dr, \quad (1)$$

где C_{c0}, C_{a0} – концентрации ионов (катионов и анионов) в емкости катионного обмена, г/л; K_n – пористость породы; r_2 – радиус капилляра, мм; $C_c = C_c(r)$, $C_a = C_a(r)$ – концентрация катионов и анионов в капилляре, зависящая от r, г/л.

В формуле (1) присутствуют две солености, одна из которых связана с поровой влагой, а вторая вызвана эффектом солености в ЕКО [26, 33]. Наличие двух соленостей позволяет учитывать ЕКО грунта отдельно и находить эту величину при интерпретации. Соленость поровой влаги обычно известна.

В режиме расчета палетки соленость (минерализация) поровой влаги меняется от заданного минимального значения (0,01 или 0,1 г/л) с достаточно частым шагом, чтобы получить гладкие кривые палетки. Содержание мелкозернистой компоненты в смеси меняется от 0 до 100 % для получения 10 кривых.

На рис.1 кроме графиков зависимости сопротивления грунта от минерализации воды синим пунктиром изображена линия УЭС воды. При высокой минерализации графики сопротивления грунта

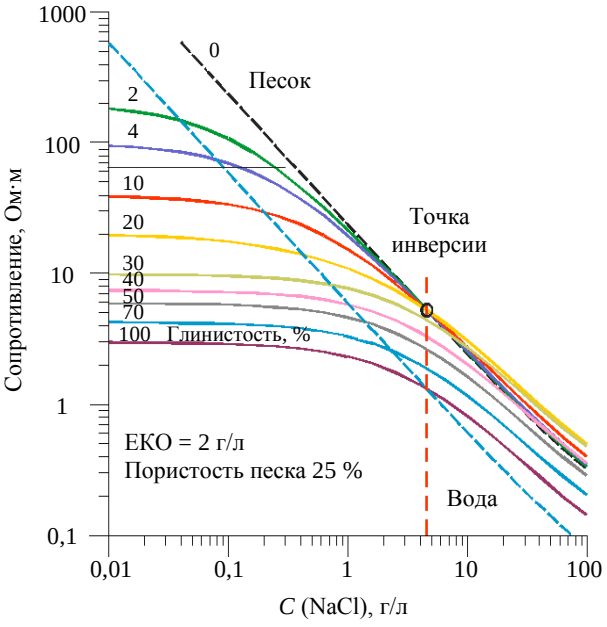


Рис.1. Зависимость изменения соотношения УЭС песчано-глинистых пород и положения точки инверсии от минерализации воды C

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

идут выше линии воды, а разница отклонений по вертикали, согласно формуле Арчи, зависит от пористости грунта. При уменьшении минерализации кривые УЭС изгибаются и пересекают линию воды. Это обусловлено воздействием двойного электрического слоя, формирующегося в глинах. Отклонение кривых от линии песка тем сильнее, чем больше содержание глинистых частиц в грунте. Линии песка и глины для содержания глины 20 % при минерализации около 1,4 г/л пересекаются в так называемой точке инверсии УЭС песчано-глинистых пород (рис.1). В этой точке наблюдается равенство значений УЭС песчано-глинистых пород.

В точке инверсии УЭС отложений не зависит от состава дисперсных отложений. При меньшей и большей минерализации относительно точки изменяется соотношение УЭС песчано-глинистых отложений. В области меньшей минерализации воды пески характеризуются наибольшим, а глины – наименьшим значениями УЭС. При минерализации, превосходящей значение в точке инверсии, наибольшим сопротивлением обладают глины, а наименьшим – пески. По мере приближения к точке инверсии показатель контрастности УЭС песчано-глинистых отложений уменьшается значительно, а при удалении от нее практически не изменяется. При увеличении минерализации значения УЭС супеси и песка практически равны, а дифференциация УЭС глин и супесей более заметна.

На положение точки инверсии наибольшее влияние оказывает величина емкости катионного обмена (рис.2). Смещение этой точки на билогарифмической диаграмме зависимости УЭС от минерализации воды происходит по линейному закону. С увеличением ЕКО от 1 до 200 г/л координаты точки инверсии изменяются на несколько порядков.

Величина ЕКО, как известно, зависит от минерального состава дисперсных пород. Из породообразующих минералов наибольшее влияние на ЕКО оказывают глинистые минералы групп каолинита, иллита и монтмориллонита [34]. Каолинит отличается наименьшей, а монтмориллонит – наибольшей физико-химической активностью.

Каолинит обладает жесткой кристаллической решеткой, в которой обменные реакции протекают только по боковым сколам. Величина ЕКО лежит в пределах 3-15 мг-экв/100 г.

Иллит (гидрослюды) также имеет жесткую кристаллическую решетку. За счет высокого отрицательного заряда обменные реакции протекают на базальных поверхностях. ЕКО изменяется в интервале 10-40 мг-экв/100 г.

Смектит (монтмориллонит) характеризуется подвижной кристаллической решеткой. Обменные реакции протекают на внешних и внутренних поверхностях структурных слоев. ЕКО колеблется в пределах 80-150 мг-экв/100 г. На частицах каолинита и гидрослюды происходит катионный обмен, а на частицах монтмориллонита – интрамицеллярный [34].

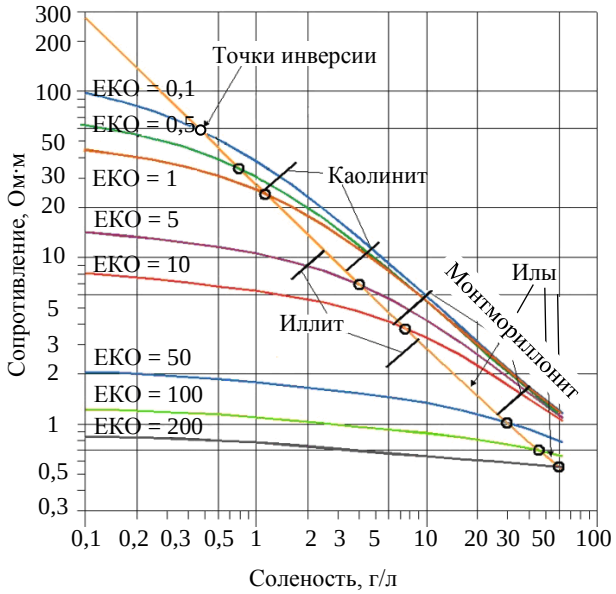


Рис.2. Диаграмма зависимости положения точки инверсии от значений ЕКО, свойственных различным минералогическим типам глин

Влияние минерального состава глин на положение точки инверсии отражает диаграмма, на которой вдоль линии смещения точки инверсии указаны интервалы значений ЕКО, свойственные различным минералогическим типам глин (рис.2).

Такой характер зависимости объясняется тем, что на электропроводность дисперсных пород кроме минерализации воды влияет простой двойной электрический слой (ДЭЗ), формирующийся на границе глинистая частица – электролит. При этом ЕКО вносит значительный вклад в электропроводность дисперсных пород. При значении ЕКО = 200 г/л величина УЭС водонасыщенной глины практически не зависит от минерализации поровой воды (рис.2).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Сопоставление координат точек инверсии при изменениях температуры показало, что этот фактор не влияет на положение точек при изменении минерализации воды *C*. Точка инверсии смещается только вдоль оси УЭС.

При проектировании дноуглубительных работ в прибрежной зоне акватории большое значение имеет определение кровли скальных или полускальных горных пород [35]. Выполнено петрофизическое моделирование для полускальных пород, особенно подверженных влиянию минерализации поровой воды. Выбраны разновидности известняка с включениями глинистого материала, к которым относятся мергелистый известняк с содержанием глины до 10 % и мергель с включениями глины до 50 %. Полученные зависимости УЭС известняка от минерализации поровой воды показали, что увеличение минерализации уменьшает УЭС известняков, но не приводит к формированию точки инверсии (рис.3).

Пористость известняков изменяется от 1 до 20 %. Черная линия на рис.3 соответствует границе, разделяющей чистые и глинистые известняки. Кривые, расположенные ниже этой линии, характеризуют известняки с различными значениями глинистости. Значение ЕКО глины, содержащейся в известняках, составляет 1,5 г/л. Температура породы принята равной 10 °С.

Необходимо отметить, что на значение УЭС пород влияют и физико-механические свойства, зависящие от пористости и водопроницаемости, а также контаминация пород нефтепродуктами [32].

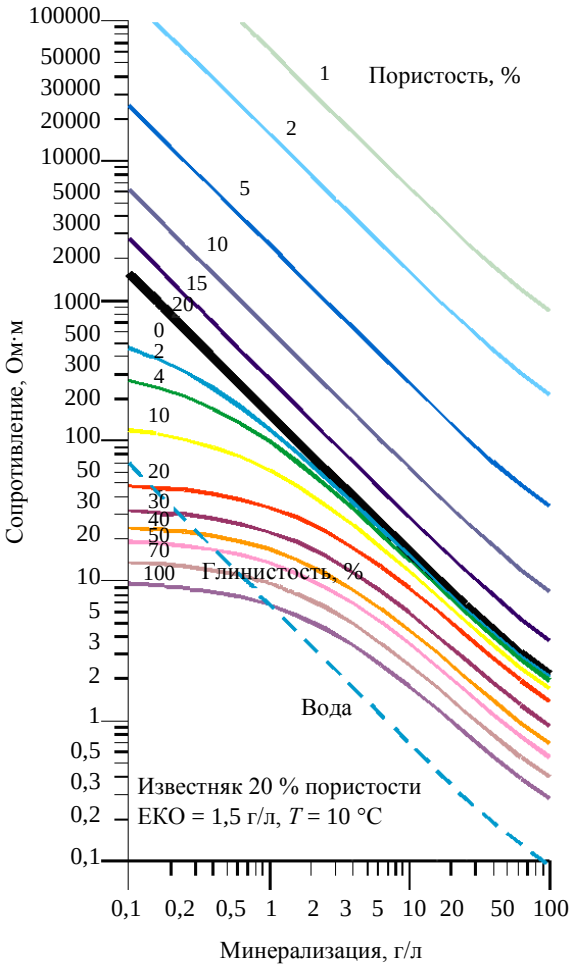


Рис.3. Палетка зависимости УЭС водонасыщенных известняков от пористости, глинистости и минерализации поровой воды

Полученные многофакторные петрофизические модели придонных отложений следует рассматривать в качестве основы корректного истолкования данных акваториальной электроразведки. Они позволяют оценить и выявить влияние различных гидрофизических условий на эффективность акваториальных электротомографических исследований, оптимизировать методику их проведения, а также повысить достоверность геологического истолкования результатов.

ЭТ модели придонных отложений морских и пресноводных акваторий

В настоящее время гидроэлектроразведочные исследования проводятся в двух модификациях. Наиболее распространенная методика надводных наблюдений предусматривает размещение электроразведочной установки на поверхности воды. Вторая методика основана на съемке с электроразведочной косой, размещенной на поверхности дна. Первая методика широко применяется при работе на открытых акваториях, в пределах которых возможно непрерывное прямолинейное перемещение электроразведочной косы вдоль линии профиля. Недалеко от береговой линии и при наличии портовой инфраструктуры целесообразно использовать донный вариант, обеспечивающий стационарное расположение электроразведочной косы в процессе съемки.

Наиболее широко надводные наблюдения осуществляются с помощью технологии непрерывных акваторных зондирований, которая соответствует измерениям вертикальных электрических зондирований в движении, обрабатываемых с помощью программ электротомографической инверсии. Съемка с донной косой обладает несомненным преимуществом, так как позволяет выполнить полноценный цикл ЭТ измерений при минимальном удалении от исследуемого геологического разреза.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 107-118
© В.В.Глазунов, Жень Ицян, Д.И.Зеликман, В.А.Шевнин, 2026

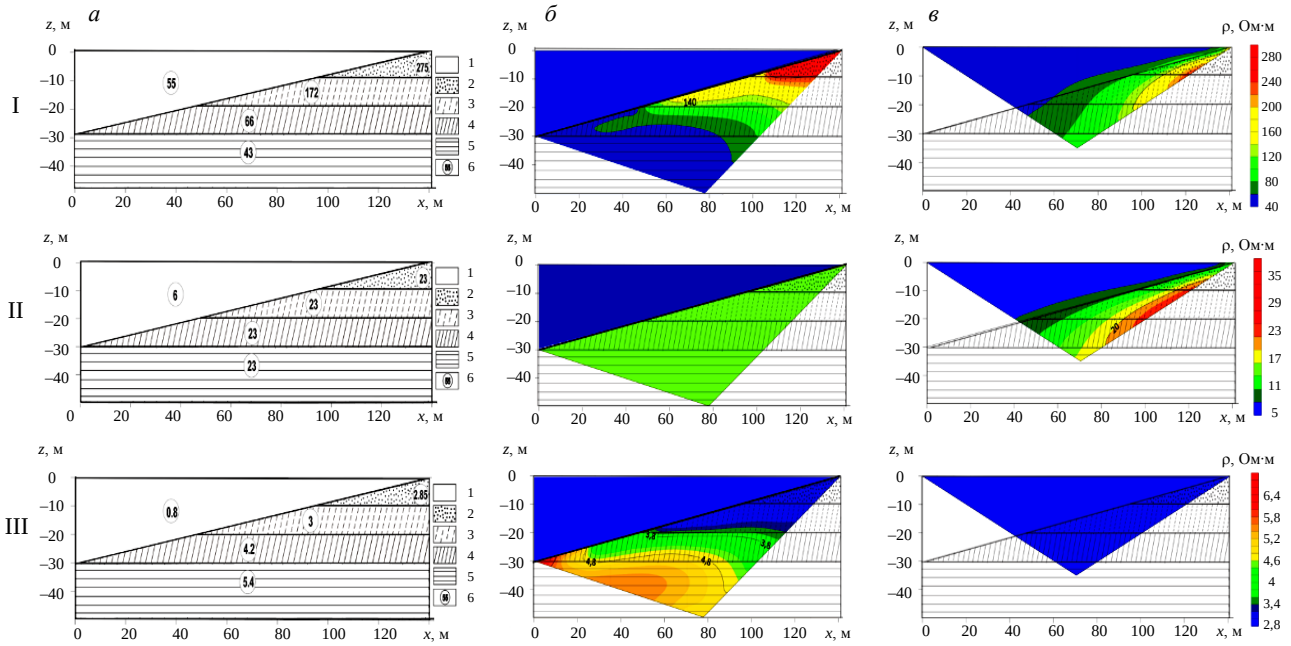


Рис.4. Геоэлектрические (*а*) и электротомографические (*б*, *в*) разрезы модели 1, синтезированные для различных значений минерализации воды при наблюдениях с донной (*б*) и акваториальной (*в*) установками Шлюмберже

1 – вода; 2 – песок; 3 – супесь; 4 – суглинок; 5 – глина; 6 – значение УЭС грунта

Для оценки эффективности акваториальных электротомографических наблюдений при изучении строения геологических разрезов придонных отложений в условиях различной солености воды синтезированы типичные модели для ДЭТ и АЭТ.

Геоэлектрическая модель 1 включает песчано-глинистые отложения, формирующие в прибрежной зоне горизонтально залегающие слои песка, супеси суглинка и глины (рис.4). Сформированы три варианта модели 1, отличающиеся значениями минерализации воды, которая составляет 0,1 (вариант I); 1,29 (вариант II) и 10 (вариант III) г/л (рис.4, *а*).

Значения минерализации выбраны так, чтобы величины УЭС песчано-глинистых пород соответствовали точке инверсии, а также интервалам, расположенным слева и справа относительно этой особой точки (см. рис.1, *а*).

Расчеты электротомографических разрезов выполнены в программе ZondRes2D (GeoTomo Ltd.) для электроразведочной установки Шлюмберже. Разрезы синтезированы как для донной (рис.4, *б*), так и для надводной (рис.4, *в*) измерительных установок, геометрические параметры которых одинаковы.

Анализ синтезированных ЭТ моделей позволяет заключить, что данные наблюдений с донной измерительной установкой обеспечивают получение более точных представлений о геоэлектрическом строении разреза. Степень и характер несоответствия электротомографического разреза геоэлектрическому при надводной системе наблюдений сильнее зависит от минерализации и толщины слоя воды, а также рельефа дна.

В случае пресной воды при C = 0,1 г/л (I) на электротомографическом разрезе, полученном для акваториальной установки (АЭТ), наблюдается искажение положения геоэлектрических границ. Горизонтальным границам исходной модели (рис.4, *а*) соответствуют криволинейные и наклонные линии изоом на электротомографических разрезах (рис.4, *в*). Структура разреза ДЭТ не искажена и в целом хорошо согласуется с горизонтально слоистым строением модели 1 (рис.4, *б*).

При минерализации воды C = 1,29 г/л (II), соответствующей точке инверсии, в которой УЭС слоев песчано-глинистого разреза одинаковы (рис.4, *а*), на разрезе АЭТ проявляются ложные относительно высокоомные аномалии (рис.4, *в*). Разрез ДЭТ характеризуется однородной геоэлектрической структурой песчано-глинистых отложений, значения УЭС которых одинаковы (рис.4, *б*), что полностью соответствует исходной модели (рис.4, *а*).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

При солености воды, соответствующей C = 10 г/л (III), применение донной установки не позволяет разделить пески и супеси (рис.4, *б*). В силу незначительного контраста УЭС на разрезе формируется объединенный геоэлектрический слой, представленный этими отложениями. Слои суглинка и глины достаточно отчетливо проявляются на разрезе ДЭТ и контролируются увеличением УЭС с глубиной (рис.4, *б*), что соответствует геоэлектрической модели (рис.4, *а*).

Важным представляется вывод о том, что надводная электроразведочная установка не позволяет получить адекватный геоэлектрическому электротомографический разрез при высокой солености. Влияние низкоомного слоя воды практически экранирует слабые аномальные эффекты от подстилающих его отложений (рис.4, *в*).

Результаты моделирования для разновидностей модели 1 показывают, что ДЭТ имеет очевидные преимущества по сравнению с надводными наблюдениями и позволяет получить, с учетом петрофизических ограничений, требуемую геофизическую информацию.

Геоэлектрическая модель 2 включает горизонтально слоистую толщу песка, супеси и суглинка, залегающую в прибрежной зоне на массиве известняков (рис.5, *а*).

Сформированы три варианта модели 2 для значений минерализации воды, которые аналогичны принятым для модели 1 и составляют 0,1 (I); 1,29 (II) и 10 (III) г/л (рис.5, *а*).

Электротомографические разрезы модели 2 синтезированы с помощью программы ZondRes2D как для донной (рис.5, *б*), так и для надводной измерительных установок Шлюмберже (рис.5, *в*) с одинаковыми геометрическими параметрами.

Результаты электротомографического моделирования показали несомненное преимущество наблюдений с донной измерительной установкой для получения корректной информации о геоэлектрическом строении разреза при различных значениях минерализации воды.

В случае пресной воды (I) на электротомографическом разрезе, полученном для АЭТ, наблюдаются искажения положения геоэлектрических границ, аналогичные установленным для модели 1 (рис.5, *в*). Разрезы ДЭТ хорошо согласуются с горизонтально слоистым строением модели 2 (рис.5, *б*).

При минерализации воды, соответствующей точке инверсии (II) (рис.5, *а*), на разрезе АЭТ наблюдаются ложные аномалии повышенных значений (рис.5, *в*). Разрез ДЭТ характеризуется однородной структурой песчано-глинистых отложений (рис.5, *б*), что полностью соответствует исходной

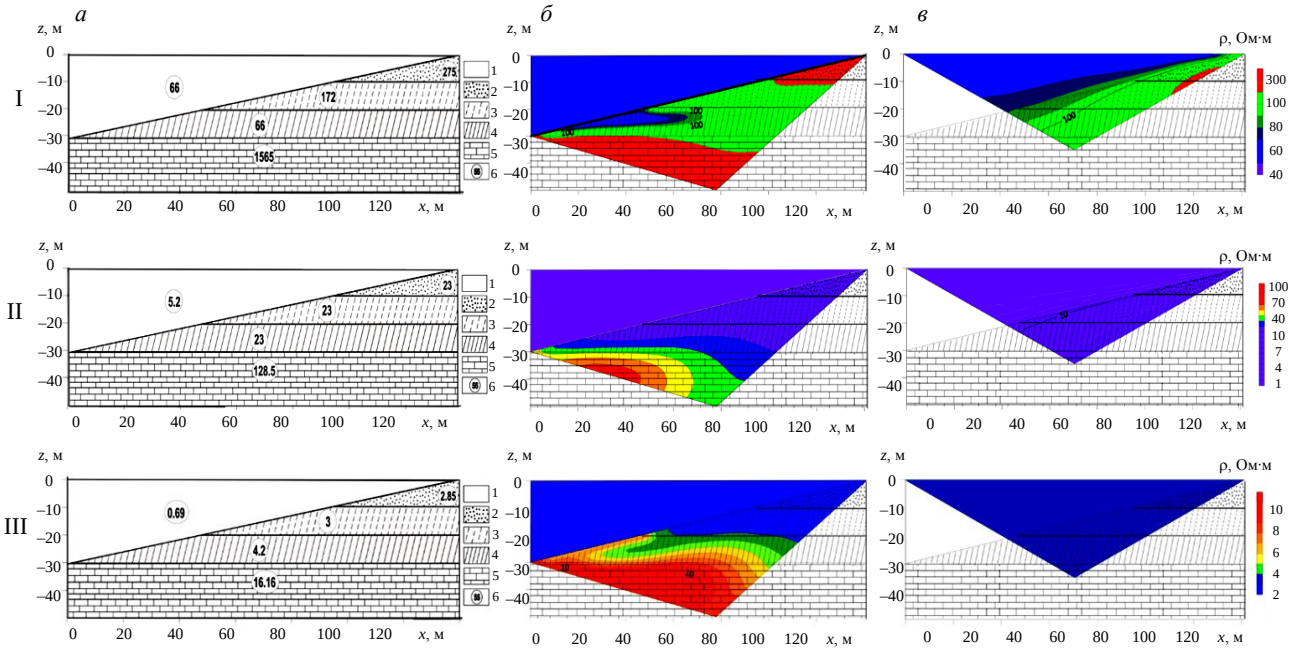


Рис.5. Геоэлектрические (*а*) и электротомографические (*б*, *в*) разрезы модели 2, синтезированные для различных значений минерализации воды при наблюдениях с донной (*б*) и акваториальной (*в*) установками Шлюмберже

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

модели (рис.5, *а*). Слои песка, супеси и суглинка имеют одинаковые значения УЭС и потому формируют объединенный геоэлектрический слой. Известняки четко проявляются на электротомографическом разрезе в виде резкого увеличения УЭС.

При солености воды, соответствующей C = 10 г/л (III), на разрезе ДЭТ слои песка и супеси формируют объединенный геоэлектрический слой, представленный этими породами. Слои суглинка и известняка проявляются отчетливо и характеризуются увеличением УЭС с глубиной (рис.5, *б*). Модификация НЭТ не позволяет изучить разрез отложений на требуемую глубину (рис.5, *в*).

Результаты модели 2 подтверждают данные, полученные для модели 1, согласно которым модификация ДЭТ более эффективна для изучения строения геологических разрезов отложений при различной минерализации воды.

Экспериментальные исследования ДЭТ в прибрежной акватории Лужской губы Финского залива

Для оценки возможностей ДЭТ при изучении придонных песчано-глинистых отложений выполнены экспериментальные работы в прибрежной акватории Лужской губы Финского залива, где в настоящее время проводятся геологические и геофизические исследования. В задачу геофизических исследований входило также выявление палеодолин, сеть которых развита в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской обл. [36].

Рельеф морского дна на участке работ абразионно-аккумулятивный, вдоль берега прослеживается прибрежная морская терраса. Дно акватории преимущественно песчаное, реже илисто-суглинистое.

Инженерно-геологическая характеристика объекта исследований. По данным бурения скважин в геологическом разрезе в пределах участка работ встречаются (рис.6):

• Морские отложения, включающие пески средней крупности с включениями гравия, гальки (ИГЭ 2.1), и суглинки тяжелые пылеватые текучие с прослоями ила (ИГЭ 2.2).

• Водно-ледниковые отложения – надморенные суглинок легкий до тяжелого пылеватый твердый (ИГЭ 3.2) и суглинок тяжелый пылеватый полутвердый до твердого (ИГЭ 5.2).

• Морские отложения Микулинского межледникового горизонта – глины легкие пылеватые полутвердые (ИГЭ 7.2) и пески разнозернистые (ИГЭ 7.1).

В качестве надежного несущего основания рекомендуется использовать водно-ледниковые межморенные суглинки пылеватые полутвердые (ИГЭ 3.2; ИГЭ 5.2) по аналогии с котлинскими глинами [31].

Гидрогеологическое строение рассматриваемого участка акватории определяется развитием единого водоносного комплекса, включающего гидравлически связанные водоносные горизонты. По условиям залегания и характеру циркуляции подземные воды комплекса относятся к поровым, безнапорным. Питание водоносного комплекса происходит за счет поверхностных вод.

По результатам химического анализа воды акватории соленые (минерализация 3,47-4,11 г/л), нейтральные до слабощелочных (pH 7,47-8,02), умеренно-жесткие до очень жестких (общая жесткость 4,8-15,30 мг-экв/л), по преобладающим анионам хлоридные, по преобладающим катионам калиево-натриевые.

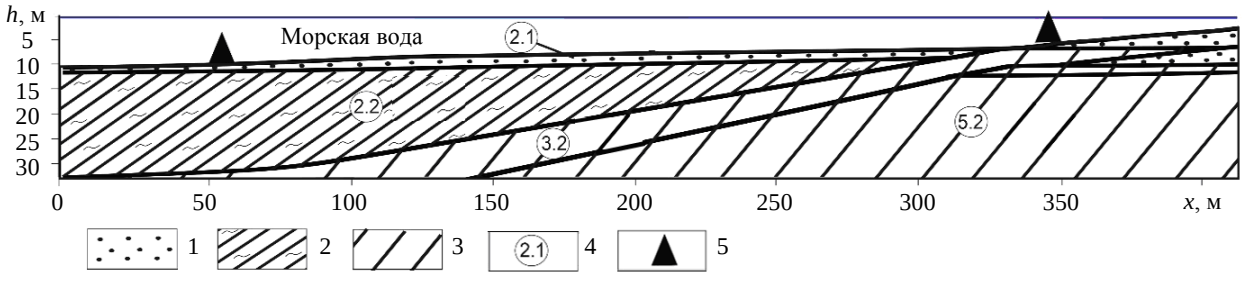


Рис.6. Инженерно-геологический разрез участка работ по данным бурения скважин 1 и 2

1 – песок; 2 – суглинок с прослоями ила; 3 – суглинки тяжелые, пылеватые твердые и полутвердые; 4 – номер ИГЭ; 5 – скважины

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На отдельных участках в водно-ледниковых межморенных и морских микулинских отложениях зафиксировано выделение газа. Газообразование связано с морскими отложениями Микулинского горизонта. Газопроявления обнаружены при вскрытии этого горизонта в отдельных изолированных песчаных линзах и прослоях водно-ледниковых межморенных отложений. При бурении скважины 2 отмечался выход природного газа. При разбуривании слоя наблюдалось интенсивное газовыделение с характерным запахом сероводорода. Видимая высота газового облака доходила до 4 м над палубой.

Методика проведения ДЭТ

Основная цель экспериментальных электроразведочных исследований сводится к оценке возможностей ДЭТ для изучения строения придонных отложений и выполнения корректной межскважинной геологической интерполяции разрезов, вскрытых скважинами 1 и 2. Особое значение для проектирования строительства портовой инфраструктуры имеет также выявление и прослеживание границ суглинков ИГЭ 5.2 и 7.2.

В настоящее время используются различные системы геофизических наблюдений. Методика съемки ДЭТ базировалась на стандартной и принятой для проведения наземной электротомографии технологии наблюдений. Измерения выполнялись с многоэлектродной электроразведочной аппаратурой Скала 48К12 (ООО «Конструкторское бюро электрометрии»). Для проведения электротомографической съемки использовалась односегментная 48-электродная коса с усиленной кевларом оболочкой кабеля и повышенной гидроизоляцией контактов. Качество гидроизоляции электродов допускало возможность работы на глубине до 20 м. В качестве электродов на косе размещены с шагом 3 м металлические трубки диаметром 17 мм. Ионоселективные электроды не применялись. Соединительные разъемы косы расположены на расстоянии 50 м от первого электрода, а конец косы, погружаемой на дно, тщательно гидроизолирован. Буфер косы обеспечивал возможность размещения аппаратуры на борту катера. Для проведения подводных наблюдений рабочая часть косы длиной 141 м прокладывалась вдоль профиля наблюдений и закреплялась на морском дне с помощью пригрузов. Перемещение раскладок косы вдоль линии профиля осуществлялось посредством буксировки катером в погруженном состоянии. Положение начального и конечного электродов косы на дне закреплялось буями в акватории, координаты которых определялись с помощью GPS-навигатора.

Измерения осуществлялись с электроразведочной установкой Шлюмберже (AMNB), N-фактор которой не превышал 5 для уменьшения влияния индукции на результаты гальванических наблюдений. Значения тока при измерениях изменялись в пределах 1,5-1,8 А, а разности потенциалов – 1-7 мВ, т.е. являлись кондиционными для расчета кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС).

Как известно, эффект индукции должен проявляться увеличением измеряемых значений КУЭС на больших разносах в виде индукционной асимптоты (Каринский, Шевнин, 2001). На полученных геоэлектрических разрезах этот эффект не наблюдался, так как выбранные характеристики режимов измерений обеспечивали минимальный вклад индукционной компоненты поля.

Для обработки данных и определения КУЭС использовались стандартные вычислительные процедуры, реализованные в сертифицированной программе Xeris, которая прилагается к электроразведочной аппаратуре Скала 48К12.

Камеральная обработка осуществлялась посредством инверсии данных подводных наблюдений с помощью программы Res2Dinv (GeoTomo Ltd.). Инверсия данных ДЭТ выполнена с учетом значений УЭС воды и рельефа дна.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты ДЭТ представлены в виде геоэлектрического разреза, на котором с учетом литологических колонок скважин 1 и 2 прорисованы геоэлектрические границы (рис.7).

Границы разделяют породы, отнесенные по литологическому составу и значениям физико-механических свойств к различным ИГЭ, индексы которых указаны на инженерно-геологическом разрезе (см. рис.6).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

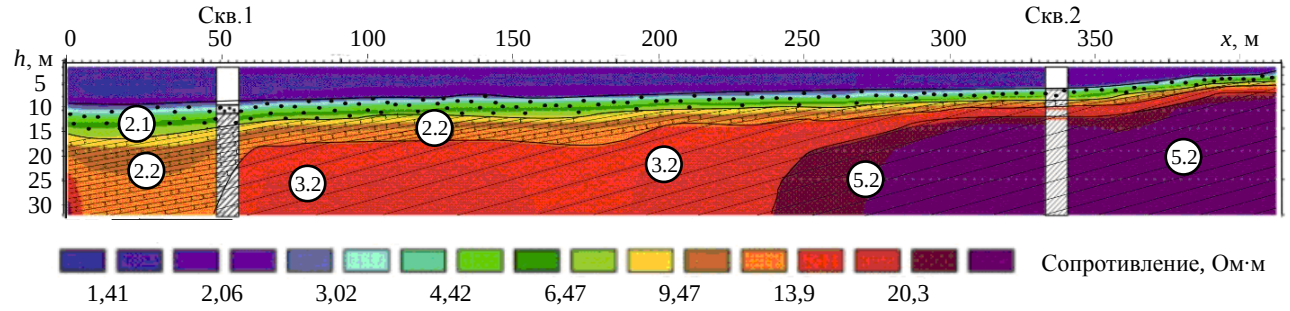


Рис.7. Геоэлектрический разрез с указанием литологических колонок по скважинам 1 и 2

2.1 – песок; 2.2 – суглинок с прослоями ила; 3.2 – суглинки тяжелые, пылеватые твердые; 5.2 – суглинки полутвердые

Значения УЭС песчано-глинистых отложений участка акватории соответствуют интервалу минерализации поровой воды, который расположен справа от точки инверсии на диаграмме (см. рис.1, *а*). По этой причине наиболее низкие значения УЭС на электротомографическом разрезе характерны для песка (ИГЭ 2.1) и суглинка с прослоями ила (ИГЭ 2.2).

Величина УЭС суглинков тяжелых, пылеватых полутвердых (ИГЭ 5.2) выше, чем суглинков твердых (ИГЭ 3.2). Это можно объяснить двумя геологическими факторами. Во-первых, суглинки ИГЭ 5.2 обладают более высоким коэффициентом пористости (равным 0,63), чем суглинки ИГЭ 3.2, у которых эта величина близка к 0,47. Вторая вероятная причина связана с тем, что суглинки ИГЭ 5.2 залегают непосредственно на газогенерирующих микулинских глинах и перекрыты более плотными суглинками ИГЭ 3.2 (см. рис.6).

Совокупность этих факторов создает геологические предпосылки для формирования повышенной газонасыщенности слоя суглинков ИГЭ 5.2. Увеличение значений УЭС этих отложений может быть обусловлено содержанием газа, поступающего из микулинских отложений.

Выявленный по данным ДЭТ рельеф кровли толщи плотных надморенных грунтов указывает на наличие русла древней долины водно-ледникового генезиса.

Таким образом, полученные результаты ДЭТ существенным образом дополняют и уточняют представления об инженерно-геологическом разрезе в межскважинном интервале и позволяют локализовать палеорусло, информация о местоположении которого необходима для обоснования проектных решений для строительства причальных сооружений порта.

Заключение

Результаты петрофизического моделирования позволили выявить особенность влияния величины ионнообменной емкости дисперсных пород на положение точки инверсии УЭС. Влияние проявляется в виде смещения точки инверсии УЭС песчано-глинистых грунтов при увеличении солености воды, обусловленного изменением минерального состава глин. Это обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации данных и проектировании морских электроразведочных исследований. Кроме того, эту особенность можно расценивать как признак, указывающий на минеральный состав глинистых пород.

Анализ электротомографических разрезов, синтезированных для различной солености воды, показал, что эффективность применения ЭТ в акваториальном и донном вариантах для изучения геологического строения прибрежных территорий существенно отличается. Донная ЭТ обеспечивает получение достоверной информации о геоэлектрическом строении разреза песчано-глинистых отложений, а на электротомографических разрезах, полученных по данным надводной ЭТ съемки, наблюдаются искажения структуры геоэлектрического разреза и проявляются ложные аномалии. Результаты численного моделирования доказывают преимущество донной ЭТ для изучения морских прибрежных территорий.

Экспериментальные работы продемонстрировали эффективность применения ДЭТ для выполнения межскважинной геологической интерполяции при проведении морских инженерно-геологических изысканий. Выявлено влияние газонасыщенности отложений на результаты ЭТ исследований.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Электротомографические исследования в донном варианте наблюдений особенно актуальны при наличии газонасыщенных илов, экранирующих распространение сейсмоакустических импульсов. Такие условия, как правило, наблюдаются в пределах прибрежных участков Финского залива, где обычно выполняются инженерно-геологические изыскания для строительства портовых сооружений и проведения дноуглубительные работ.

Авторы благодарят ООО «ГТ МорГео» за предоставленные материалы и помощь в проведении экспериментальных работ методом донной электротомографии, а также ООО «ДЖИ М Сервис» за предоставление программного обеспечения ZondRes2D.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Горелик Г.Д., Егоров А.С., Шуклин И.А., Ушаков Д.Е.* Обоснование оптимального комплекса геофизических исследований глубинного строения района озера Восток // Горный журнал. 2024. № 9. С. 56-61. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.09
2. *Egorov A., Antonchik V., Senchina N. et al.* Impact of the Regional Pai-Khoi-Altai Strike-Slip Zone on the Localization of Hydrocarbon Fields in Pre-Jurassic Units of West Siberia // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 12. № 1511. DOI: 10.3390/min13121511
3. *Васильев С.А., Григорьева Н.В., Медведев Н.О. и др.* Могильник Плакун: новое открытие известного памятника по результатам ВЛС и георадиолокационных исследований // Уфимский археологический вестник. 2024. Т. 24. № 3. С. 573-586. DOI: 10.31833/uav/2024.24.3.038
4. *Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V.* Integration of Seismic Refraction and Fracture-Induced Electromagnetic Radiation Methods to Assess the Stability of the Roof in Mine-Workings // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 5. № 609. DOI: 10.3390/min12050609
5. *Сысоев А.П., Зайцев С.А.* Отдельные вопросы динамической инверсии волнового поля // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. № 3 (55). С. 52-58. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-52-58
6. *Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И.* Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 198-215. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152
7. *Данильев С.М., Мулев С.Н., Шнюкова О.М.* Корреляционно-регрессионный анализ активности естественной электромагнитной и акустической эмиссии в образцах горных пород Октябрьского месторождения // Горный журнал. 2024. № 9. С. 51-55. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08
8. *Сысоев А.П.* Аналитические решения задач компенсации неоднородности верхней части разреза в сейсморазведке МОВ // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. № 1 (53). С. 36-43. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-1-36-43
9. *Калинин Д.Ф., Егоров А.С., Большакова Н.В., Секерина Д.Д.* Информационно-статистический прогноз нефтегазоносности в краевой части Корякско-Камчатской складчатой области // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 1. Вып. 57. С. 63-88. DOI: 10.31431/1816-5524-2023-1-57-63-88
10. *Буданов Л.М., Сергеев А.Ю., Чекулаев А.В.* Высокочастотное сейсмоакустическое профилирование мелководных опресненных акваторий на примере Невской губы // Инженерная и рудная геофизика 2023: Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2023», «Инженерная и рудная геология 2023», «Морские технологии 2023», 15-19 мая 2023, Санкт-Петербург, Россия. М.: Геомодель, 2023. С. 124-133.
11. *Миринец А.К., Рыбалко А.Е., Алешин М.И., Субетто Д.А.* Строение четвертичного покрова Петрозаводской губы Онежского озера по данным сейсмоакустики // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2024. № 1. С. 123-129. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-123-129
12. *Миринец А.К., Бобачев А.А., Миронюк С.Г.* Выделение мерзлых и газонасыщенных грунтов в Обской губе Карского моря по данным донной электротомографии в комплексе с акустическим профилированием и бурением // Геофизика. 2022. № 6. С. 35-42. DOI: 10.34926/geo.2022.11.15.005
13. *Миринец А.К., Бобачев А.А., Рыбалко А.Е.* Исследования донных отложений Онежского озера методами сейсморазведки и электроразведки // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. № 2. С. 5-22. DOI: 10.21455/std2022.2-2
14. *Буданов Л.М., Глазунов В.В., Сергеев А.Ю., Ефимова Н.Н.* Применение методов гидроэлектроразведки для картирования форм палеорельефа акватории «Сестрорецкий Разлив» // Естественные и технические науки. 2017. № 3 (105). С. 52-57.
15. *Zi-Yin Ren, Xiu-Jun Guo, Jing-Xin Wu.* Simulation and Analysis of Detection Results of Shallow Gas Under Shallow Water with a Navigated DC Marine Resistivity Method // Periodical of Ocean University of China. 2019. Vol. 49. Iss. 7. P. 56-63. DOI: 10.16441/j.cnki.hdxb.20180231
16. *Chang Gao, Xiujun Guo, Shuai Shao, Jingxin Wu.* Using MODFLOW/MT3DMS and electrical resistivity tomography to characterize organic pollutant migration in clay soil layer with a shallow water table // Environmental Technology. 2021. Vol. 42. Iss. 28. P. 4490-4499. DOI: 10.1080/09593330.2020.1767699
17. *Tassis G.A., Tsourlos P.I., Rønning J.S.* Detection and characterization of fracture zones in bedrock in marine environment: possibilities and limitations // Near Surface Geophysics. 2020. Vol. 18. Iss. 1. P. 91-103. DOI: 10.1002/nsg.12086
18. *Неевин И.А., Буданов Л.М., Сергеев А.Ю. и др.* Геолого-геофизические методы как источник базовой информации для последующих биологических исследований и картирования подводных ландшафтов // Региональная экология. 2015. № 4 (39). С. 5-24.
19. *Шкиря М.С., Ланкин Ю.К., Терешкин С.А. и др.* Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 160-170. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3766

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

20. *Niculescu B.M., Andrei G.* Application of electrical resistivity tomography for imaging seawater intrusion in a coastal aquifer // Acta Geophysica. 2021. Vol. 69. Iss. 2. P. 613-630. DOI: 10.1007/s11600-020-00529-7

21. *Миронюк С.Г., Хлебникова О.А.* Признаки и геологические предпосылки интрузии морской воды в прибрежные водоносные горизонты (на примере Черного моря) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2022. № 3. С. 24-37. DOI: 10.31857/S0869780922030067

22. *Ekwok S.E., Ben U.C., Eldosouky A.M. et al.* Towards understanding the extent of saltwater incursion into the coastal aquifers of Akwa Ibom State, Southern Nigeria using 2D ERT // Journal of King Saud University – Science. 2022. Vol. 34. Iss. 8. № 102371. DOI: 10.1016/j.jksus.2022.102371

23. *Cheng Xing, YuPing Luo, XiuJun Guo et al.* Simulation analysis of monitoring effect of electrical resistivity tomography in seawater-groundwater exchange process // Progress in Geophysics. 2022. Vol. 37. Iss. 6. P. 2622-2629. DOI: 10.6038/pg2022FF0603

24. *Guangxiang Zhu, Xiujun Guo, Le Yu et al.* Analysis on Resistivity Characteristics and Resistivity Model Building of Marine Soil with High Clay Content // Journal of Jilin University (Earth Science Edition). 2019. Vol. 49. № 5. P. 1457-1465. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20180226

25. *Hao Sun, JiTong Sun, JingXin Wu et al.* Simulation analysis of monitoring effect of marine resistivity method in shallow gas evolution process // Progress in Geophysics. 2022. Vol. 37. Iss. 3. P. 1311-1320. DOI: 10.6038/pg2022FF0199

26. *Xiaoteng Xiao, Yufeng Zhang, Tengfei Fu et al.* The two salinity peaks mode of marine salt supply to coastal underground brine during a single tidal cycle // Frontiers in Marine Science. 2024. Vol. 10. № 1324163. DOI: 10.3389/fmars.2023.1324163

27. *Tao Zhang, Songyu Liu, Guojun Cai.* Correlations between electrical resistivity and basic engineering property parameters for marine clays in Jiangsu, China // Journal of Applied Geophysics. 2018. Vol. 159. P. 640-648. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.10.012

28. *Capozzoli L., Giampaolo V., De Martino G. et al.* ERT and GPR Prospecting Applied to Unsaturated and Subwater Analogue Archaeological Site in a Full Scale Laboratory // Applied Science. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 1126. DOI: 10.3390/app12031126

29. *Simyrdanis K., Papadopoulos N., Kim J.-H. et al.* Archaeological investigations in the shallow seawater environment with electrical resistivity tomography // Near Surface Geophysics. 2015. Vol. 13. P. 601-611. DOI: 10.3997/1873-0604.2015045

30. *Papadopoulos N., Oikonomou D., Simyrdanis K., Loke Meng Heng.* Practical considerations for shallow submerged archaeological prospection with 3-D electrical resistivity tomography // Archaeological Prospection. 2022. Vol. 29. Iss. 1. P. 1003-123. DOI: 10.1002/arp.1841

31. *García-Menéndez O., Ballesteros B.J., Renau-Pruñonosa A. et al.* Using electrical resistivity tomography to assess the effectiveness of managed aquifer recharge in a salinized coastal aquifer // Environmental Monitoring and Assessment. 2018. Vol. 190. Iss. 2. № 100. DOI: 10.1007/s10661-017-6446-9

32. *Dusart J., Tarits P., Fabre M. et al.* Characterization of gas-bearing sediments in the coastal environment using geophysical and geotechnical data // Near Surface Geophysics. 2022. Vol. 20. Iss. 5. P. 478-493. DOI: 10.1002/nsg.12230

33. *Moulds M., Gould I., Wright I. et al.* Use of electrical resistivity tomography to reveal the shallow freshwater–saline interface in The Fens coastal groundwater, eastern England (UK) // Hydrogeology Journal. 2023. Vol. 31. Iss. 2. P. 335-349. DOI: 10.1007/s10040-022-02586-2

34. *Королев В.А.* Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. М.: Сам полиграфист, 2015. 486 с.

35. *Dashko R.E., Karpenko A.G.* Scientific-Practical Enhancement Principles for the Long-Term Stability of Cultural Heritage Objects through a Multi-Component Underground Space Analysis // Heritage. 2024. Vol. 7. Iss. 8. P. 4455-4471. DOI: 10.3390/heritage7080210

36. *Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А.* Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180-190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13

***Авторы*: Владимир Васильевич Глазунов,** *д-р техн. наук, профессор* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-5816-0507*, **Жень Ицян,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0006-6172-4514*, **Данил Игоревич Зеликман,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *Zelikman26danil07@gmail.com*, *https://orcid.org/0009-0003-0044-2298*, **Владимир Алексеевич Шевнин,** *д-р физ.-мат. наук, профессор* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-9517-6188*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0