

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ, ЗАГРЯЗНЁННЫХ ЛЁГКИМИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Т. А. Мингалева^{ID}*,¹, С. В. Шакуро² и А. С. Егоров^{ID}¹

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

²ООО «ФРОНТ Геология», Нижний Новгород, Россия

Получено 25 декабря 2022 г.; принято 26 января 2023 г.; опубликовано 8 февраля 2023 г.

Для решения экологических задач по поиску углеводородных загрязнений довольно часто используются методы малоглубинной геофизики. На загрязнённых участках знания о геологическом строении и гидрогеологических условиях, а также качественных и количественных характеристиках загрязнения необходимы для оценки рисков и планирования реабилитации территории. В статье рассматривается влияние различных факторов на формирование аномалий, выявляемых методами малоглубинной геофизики в процессе изучения загрязнения геологической среды нефтепродуктами. Основной целью подобных работ является обнаружение, оконтуривание и определение путей миграции лёгких нефтепродуктов. В работе описывается несколько обобщённых моделей распространения углеводородного загрязнения, каждая из которых может использоваться для решения поставленных задач, а также быть полезным инструментом для прогнозирования распространения нефтепродуктов и моделирования геофизических откликов от многофакторной среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лёгкие нефтепродукты, малоглубинная геофизика, микроорганизмы, гидрогеология, подземное пространство, мониторинг.

Цитирование: Мингалева, Т. А., С. В. Шакуро, и А. С. Егоров, (2023), Изучение влияния факторов, определяющих результаты геофизических исследований на территориях, загрязнённых лёгкими нефтепродуктами, *Russian Journal of Earth Sciences*, т. 23, ES1002, 10.2205/2023ES000831.

1 ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение нефтепродуктами (НП) грунтов и подземных вод на промышленных площадках происходит по многим причинам, например, из-за утечек из резервуаров, из-за неправильного размещения неочищенных отходов в грунтах. Наибольшую опасность представляют собой нефтепродукты в виде лёгкой неводной фазы жидкости (light non-aqueous phase liquid (LNAPL)), являющиеся канцерогенными для организма человека и представляющие постоянную угрозу экологической среде в связи с их высокой мобильностью в грунтах [Гупало, 2020; Пашкевич и др., 2020; Шулаев и др., 2021].

Распространение нефтепродуктов в среде динамично как в пространственной, так и во временной областях. Правильное понимание модели распространения нефтепродуктов на загрязнённой тер-

ритории с использованием всех имеющихся данных о загрязнении и знание гидрогеологических условий имеют решающее значение для выбора наиболее подходящей методики при решении задач по параметризации линзы нефтепродуктов.

2 МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Существует множество моделей, описывающих распространение нефтепродуктов в среде. В статье описаны несколько наиболее распространённых моделей и перечислены основные факторы, формирующие геофизические аномалии, что, по мнению авторов, поможет лучшему пониманию химических и физических процессов, протекающих при техногенном загрязнении грунтов углеводородами.

*Контакт: tatiana.mingaleva@bk.ru

2.1 Обобщённая модель распространения нефтепродуктов

Распространение техногенного загрязнения – нефтепродуктов – в геологической среде имеет сложный характер и требует рассмотрения геометрии распространения поллютанта, гидрогеологических условий, вариаций свойств грунтов в плане и в разрезе. Согласно литературным источникам [Atekwana и Atekwana, 2010; Garg и др., 2017; Johansson и др., 2015] выделяются два основных типа углеводородов-поллютантов в виде неводной фазы жидкости: лёгкие (LNAPL), которые представляют наибольшую опасность для окружающей среды, так как подвижны и могут распространяться вместе с грунтовыми водами на значительные расстояния от источника, а также плотные (dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) – практически неподвижные, или имобилизованные, нефтепродукты, обычно залегающие непосредственно в местах разливов.

Общая картина распространения углеводородов представляет собой движение загрязнений вертикально вниз под действием силы тяжести и латерально или радиально за счёт капиллярных сил. Проникновение нефтепродуктов в более глубокие горизонты зависит от типа нефтепродукта и его подвижности, гранулометрического состава и пористости вмещающих грунтов, направления и скорости движения грунтовых вод и т. д. При переслаивании грунтов разного гранулометрического состава радиальная миграция за счёт капиллярных сил резко тормозится. Это связано, по-видимому, с неодинаковым капиллярным давлением в слоях, что определяет энергетический барьер, препятствующий движению поллютантов [Путылина и др., 2019; Yang и др., 2013]. В литературных источниках имеется много моделей переноса нефтепродуктов [Atekwana и Atekwana, 2010; Garg и др., 2017; Sauck, 2000]. В общем случае, модель углеводородного загрязнения включает четыре фазы нефтепродуктов [Рязанцев и др., 2017; Atekwana и Atekwana, 2010; Garg и др., 2017]:

1. Фаза с растворёнными нефтепродуктами в водонасыщенной зоне: шлейф загрязняющих веществ, которые переносятся в водоносном горизонте – *растворённая фаза*.
2. Фаза со свободной формой углеводородов (УВ) близ кровли зоны полного водонасыщения, так называемая зона размазывания (под воздействием колебаний пьезометрической поверхности) – *свободная фаза*.
3. Углеводороды, адсорбированные почвами и горными породами зоны аэрации – *остаточная фаза*.

4. Газообразная фаза, или зона дегазации в зоне аэрации.

В районе источника нефтепродуктов, в зоне аэрации и в зоне полного водонасыщения, будут присутствовать все четыре фазы [Atekwana и Atekwana, 2010], причём остаточная и свободная фаза являются вместилищем основного количества нефтепродуктов. В свободной фазе редко содержатся только нефтепродукты, обычно здесь наблюдается 30–50%-ное насыщение углеводородами в смеси воздухом, водяным паром и водой. В зоне полного водонасыщения ареал углеводородного загрязнения представлен шлейфом растворённой фазы, где нефтепродукты распространяются с наибольшей скоростью.

Таким образом, обобщённая схема углеводородного загрязнения, продемонстрированная на рис. 1, показывает области распространения нефтепродуктов различных фаз, а также подчёркивает тот факт, что на измеряемые геофизические поля влияет множество факторов: динамика процесса, степень насыщенности нефтепродуктами, количество заземлённого в порах и свободного нефтепродукта, уклон и характер колебаний уровня грунтовых вод.

2.2 Модель «истощения естественного источника»

В последние десятилетия большое распространение получила концептуальная модель «истощения естественного источника» (natural source zone depletion) [Garg и др., 2017], которая включает в себя характеристики и процессы, происходящие в геологической среде в ходе естественного развития углеводородного загрязнения. Эта модель уточняет ряд химических процессов и характеризует «старые» участки, некогда подвергшиеся активному загрязнению. Большую роль в этой модели играет метаногенез, связанный с переносом газов: метана, двуокиси углерода и летучих органических соединений (ЛОС) через зону аэрации. Метаногенез является частью синтрофии, подразумевающей совместное разложение сложных органических веществ. В анаэробных условиях бактерии-нефтередукторы разлагают углеводороды и образуют растворённый водород и/или ацетат, а затем метаногены используют водород и/или ацетат для образования метана. Подробный обзор этих реакций см. в Gieg и др. [2014]. В статье [Garg и др., 2017] модель распространения УВ, представленная на рис. 1, дополняется информацией с точки зрения вышеуказанной концептуальной модели, что отражено на рис. 2.

В зоне полного водонасыщения происходит значительный метаногенез, что приводит к прямому

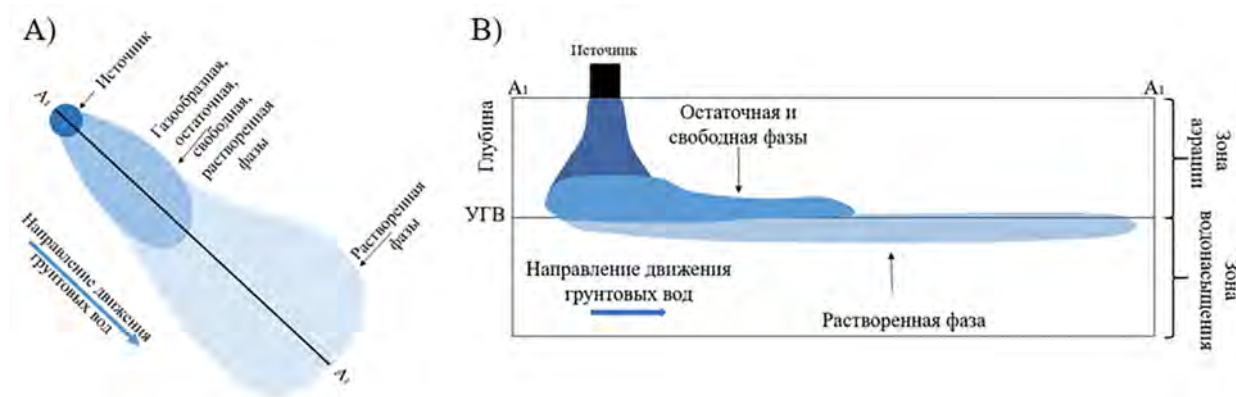


Рис. 1: Модель распространения углеводородов в грунтах: А – по площади; В – в разрезе [рисунок адаптирован из Atekwana и Atekwana, 2010].

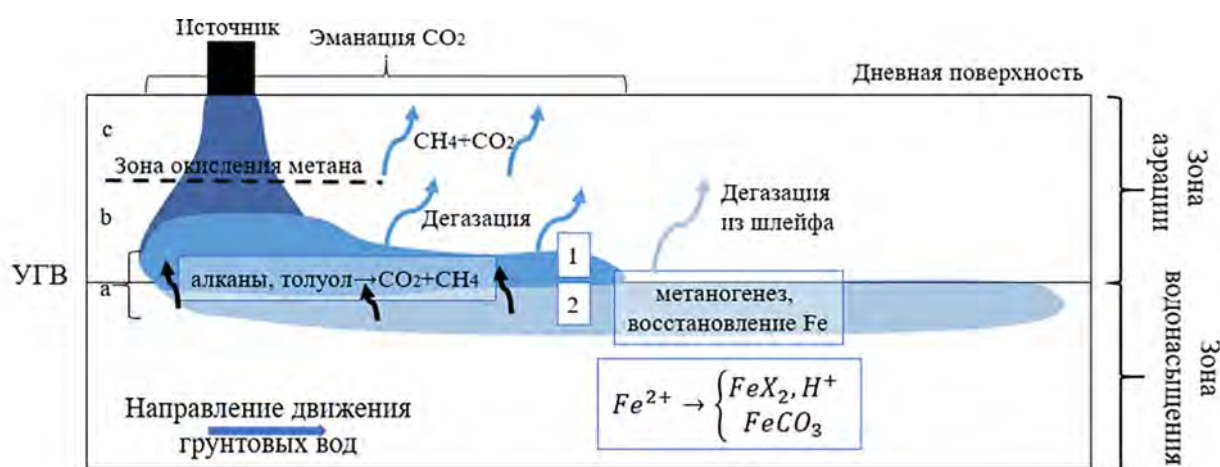


Рис. 2: Модель распространения углеводородного загрязнения в грунтах: 1 – остаточная и свободная фаза, 2 – растворённая фаза [рисунок адаптирован из Atekwana и Atekwana, 2010; Garg и др., 2017].

дегазированию и образованию метана и углекислого газа (рис. 2, а). Дегазация также происходит в нижней части зоны аэрации, а полученный газ мигрирует по направлению к дневной поверхности. Процесс обусловлен биodeградацией нефтепродуктов [Meckenstock и др., 2014]. Благодаря биodeградации, намного превышающей ассимиляционную способность грунтовых вод переносить или разлагать растворённый метан [см., например Ng и др., 2015], происходит дегазация. Согласно литературным источникам [например, Essaid и др., 2011], в зоне растворённой фазы происходит восстановление железа.

Окисление метана происходит в зоне аэрации, которая делится на две части: анаэробную транспортную зону (рис. 2, b) и аэробную транспортную зону (рис. 2, c) Ближе к поверхности большая часть или весь метан и летучие органические соединения (если они присутствуют) окисляются

до двуокиси углерода [Amos и др., 2005; Irianni-Renno и др., 2016].

Таким образом, согласно модели «истощения естественного источника», большую роль на техногенно-загрязнённых территориях играет метаногенез, в результате которого из областей, где происходит переработка углеводородов микроорганизмами, выделяются газы в аномальной концентрации как вторичные продукты жизнедеятельности бактерий.

2.3 Особенности распространения нефтепродуктов в грунтах, подстилающих участки нефтебаз

Самым распространённым из постоянно действующих источников загрязнения грунтов нефтепродуктами являются нефтебазы, где происходит хранение и дальнейшая транспортировка продуктов нефтяной отрасли. Зачастую они распола-

гаются по берегам рек, куда и происходит выгрузка загрязнённых поллютантами грунтовых вод. Так как большинство баз хранения нефтепродуктов существует длительное время, необходимо делать поправку на временное изменение свойств, вызванное деградацией нефтепродуктов, и исследовать предполагаемые загрязнённые участки по физическим параметрам, характерным для «старых» загрязнителей.

Если рассматривать площадное распространение разлива лёгких нефтепродуктов на поздних этапах (рис. 3), то модель загрязнения будет иметь три зоны: донорскую, транзитную и зо-

ну вторичного накопления. Первая зона представляет собой участок, где располагаются источники поступления нефтепродуктов в грунт (продуктопроводы, наливные эстакады, резервуары с нефтепродуктами) и откуда, возможно, происходит постоянный приток загрязняющего вещества. Вторая зона – транзитная – контролирует процесс горизонтального перемещения гравитационно-подвижных нефтепродуктов по уклону зеркала грунтовых вод в сторону местного базиса эрозии. Третья зона – зона вторичного накопления – как правило располагается у берега водного объекта. Одна из причин задержки неф-

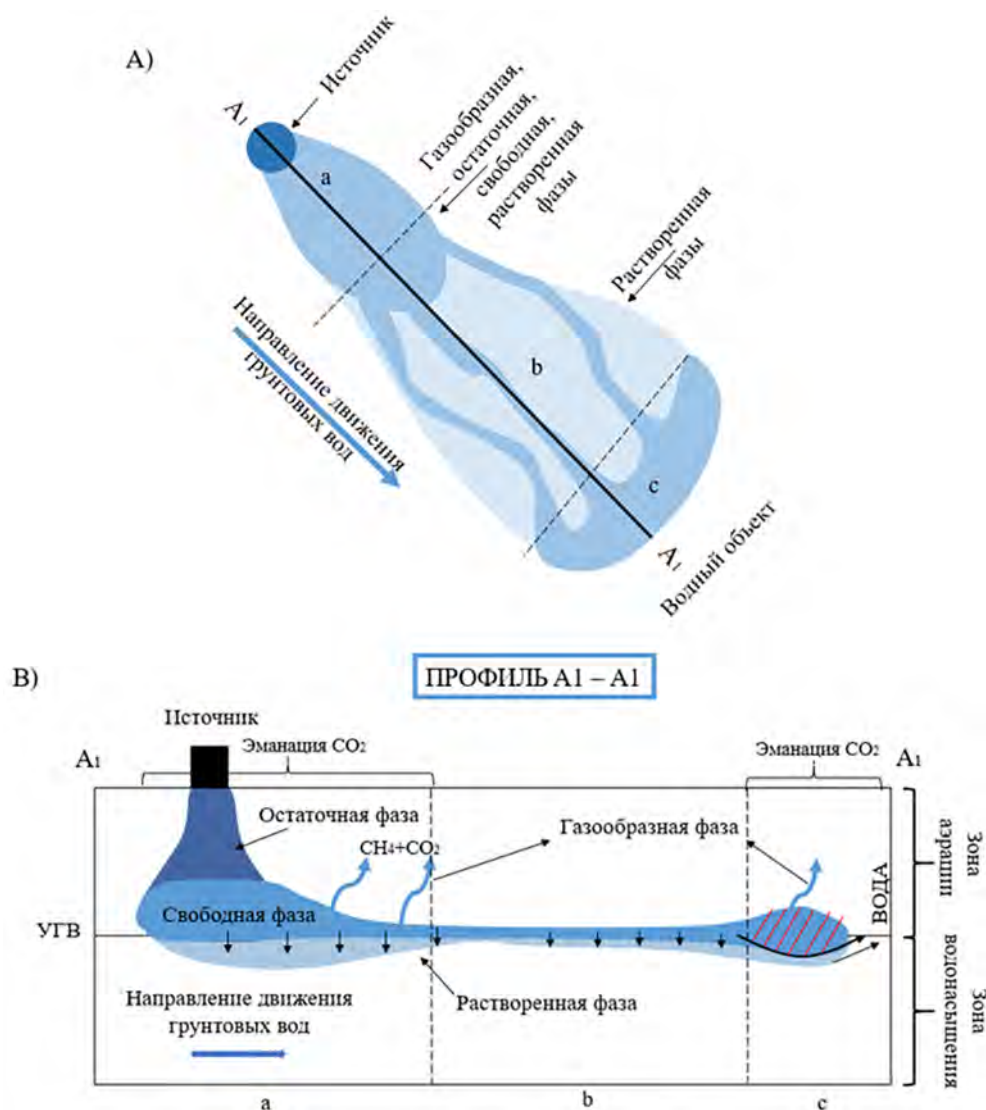


Рис. 3: Модель распространения углеводородного загрязнения в грунтах: 1 – остаточная и свободная фаза, 2 – растворённая фаза [рисунок адаптирован из Atekwana и Atekwana, 2010; Garg и др., 2017]. Модель распространения нефтепродуктов в грунтах вблизи водного объекта: А – площадное распределение, В – разрез по линии А1–А1 (а – донорская зона, b – транзитная зона; c – зона вторичного накопления; красными штрихами выделен геохимический барьер) [рисунок адаптирован из Atekwana и Atekwana, 2010; Garg и др., 2017].

тепродуктов в зоне вторичного накопления – наличие гидродинамического и/или геохимического барьера [Максимович и Хайрулина, 2011].

При такой схеме распространения поллютантов большой интерес представляет третья зона, где вторично накапливаются нефтепродукты. Согласно [Максимович и Хайрулина, 2011] после попадания нефтепродуктов в грунтовые воды и их движения в зону разгрузки, в прибрежной части образуется гидродинамический барьер, или ловушка, связанная с особенностями фильтрационного потока. Барьер образуется для свободной фазы, в результате чего происходит аккумуляция, накопление или рассеивание части нефтепродуктов в области над грунтовыми водами, в свою очередь углеводороды в растворённой фазе спокойно преодолевают барьер и попадают в водные объекты (рис. 3, В).

Таким образом, модель распространения лёгких нефтепродуктов вблизи водных объектов подразделяется на три зоны, в которых происходят процессы распространения и аккумуляции нефтепродуктов, что отражается на физических свойствах грунтов благодаря активным химическим и биологическим реакциям и, как следствие, влияет на результаты геофизических исследований.

3 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБНАРУЖЕНИЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ МЕТОДАМИ НАЗЕМНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Понимание процессов, происходящих в подповерхностном пространстве при распространении нефтепродуктов, помогает правильно сопоставить вариации физических свойств, выявленные по геофизическим данным, и положение загрязнённых участков.

Известно об изменениях объёмной электропроводности, скорости распространения и амплитуды акустических волн, что может использоваться в качестве индикаторов биоактивности на участках, загрязнённых лёгкими нефтепродуктами [Atekwana и Atekwana, 2010].

На начальной стадии загрязнения нефтепродукты характеризуются следующими физическими параметрами, отличающими их от вмещающей среды: высокие значения удельного электрического сопротивления, в широком диапазоне от 10^6 до 10^9 Ом·м и, как следствие, низкие значения проводимости (0,001 мСм/м) по отношению к грунтовым водам (0,1–1 мСм/м для пресной воды); низкую относительную диэлектрическую проницаемость (порядка 2–3) по сравнению с чистой

водой (81) и водонасыщенными песками (7–15) [Atekwana и Atekwana, 2010].

С течением времени активизируются процессы внутригрунтовой деструкции, в результате чего нефтепродукты претерпевают физико-химические, микробиологические изменения, а также растворение, деградацию, частичное разрушение и т.д. [Путилина и др., 2019]. В результате, характер геофизических аномалий изменяется и представляет собой отклик от сложной многофакторной среды. Факторы, влияющие на характер геофизических аномалий, будут выделены в пунктах 3.1–3.11.

3.1 Время нахождения нефтепродуктов в грунтах

Распространение нефтеразливов динамично в пространстве и во времени. Как было отмечено рядом авторов [см., например Deceuster и Kaufmann, 2012; Mellage и др., 2018], под действием различных процессов в течение длительного периода времени происходит трансформация нефтепродуктов, что сказывается на изменении их характеристик. Таким образом, условно можно выделить два периода трансформации нефтепродуктов: краткосрочный, во время которого нефтеразливы можно называть «свежими», и долгосрочный, во время которого нефтеразлив попадает в разряд «старого». В работе Atekwana и Atekwana [2010] показано, что длительность краткосрочного периода составляет от нескольких недель до нескольких лет. При этом, в течение этого периода активно происходит физическое разделение загрязняющего вещества на различные фазы, в то время как биологические и химические факторы практически не проявляются. При более длительном нахождении нефтепродуктов в грунтах большое влияние на подповерхностное пространство оказывают процессы биodeградации.

3.2 Деятельность микроорганизмов

Одними из определяющих факторов изменения свойств грунтов, загрязнённых нефтепродуктами, являются биологические процессы, происходящие благодаря деятельности микроорганизмов. Для эффективного биоразложения необходимо присутствие микробных популяций, способных разлагать те лёгкие нефтепродукты, которые послужили причиной загрязнения, а также благоприятные условия: влажность, наличие кислорода и питательных веществ [Griebler и Lueders, 2009].

Микробная трансформация лёгких нефтепродуктов в загрязнённых недрах образует сложную биофизико-химическую среду. Присутствие, типы

и распределение различных микробных популяций определяется наличием и концентрацией органического углерода из техногенных источников, который служит донором электронов, и процессами терминального донора-акцептора электронов, которые запускают биodeградацию поллютантов.

Замечено, что максимальные изменения физических свойств грунтов происходят в области капиллярной каймы и верхней части зоны полного водонасыщения. Именно в этих зонах сосредоточены самые высокие популяции микроорганизмов, разлагающих углеводороды, и вероятны максимальные изменения геофизических признаков (увеличение проводимости, максимальное затухание амплитуд сигналов георадара и т.д.) [Atekwana и Atekwana, 2010]. Ниже действия микроорганизмов раскрыты более подробно.

3.2.1 Изменение структуры породы

Высокий метаболизм микроорганизмов, участвующих в разложении нефтепродуктов, вызывает значительные трансформации в подземном пространстве, что выражается в производстве биомассы и развитии биоплёнок, которые изменяют структуру минерального скелета [например, Abdel Aal и др., 2004; Atekwana и др., 2004].

Изменение структуры породы происходит в результате выветривания, усиленного либо прямым действием колоний бактерий, либо побочными продуктами разложения (например, уголекислотой и органическими кислотами). При этом выветрившийся материал попадает в подземные воды и поровые флюиды.

Присутствие биоплёнок с большой площадью поверхности, их прикрепление к минеральным зёрнам изменяет электрические свойства поверхности благодаря электрическому заряду, вызванному микробами, и увеличению площади поверхности за счёт большей площади микробной плёнки. Сужение пор усиливает эффекты поляризации мембраны, что может быть зафиксировано в виде аномального отклика в методе вызванной поляризации [например, Ntarlagiannis и др., 2005].

В целом, изменения в поровом пространстве приводят к изменению объёмной электропроводности, которое можно выявить с помощью методов сопротивления, вызванной поляризации и георадиолокации.

3.2.2 Изменение ионного состава грунтовых вод и поровых флюидов

Из-за микробиологической активности уменьшается концентрация лёгких нефтепродуктов, но ускоряется процесс образования побочных продуктов метаболизма, которые выветривают мине-

ралы, слагающие водовмещающие породы и зону аэрации, а также изменяют химический состав порового флюида.

Рядом авторов описываются результаты анализа проб воды, загрязнённой углеводородами [например, Tumov и др., 2012; Flores Orozco и др., 2011]. В растворах были обнаружены элементы: Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^{2-} , SO_4^{2-} , которые не фиксировались в чистой воде.

Изменения в химическом составе поровой влаги непосредственно приводят к изменениям электролитической проводимости, которые можно зафиксировать методами сопротивлений и комплексной проводимости (ввиду изменений как плотности ионного заряда, так и подвижности ионов), электромагнитной индукции, георадиолокации (увеличение затухания) и ЕП (диффузионные потенциалы).

3.3 Окислительно-восстановительные реакции и сопутствующие процессы терминальных акцепторов электронов

Микробное окисление нефтепродуктов сопровождается окислительно-восстановительными реакциями (ОВР). Так, например, посредством ОВР электроны органических соединений передаются терминальным акцепторам электронов (ТАЭ) (O_2 , NO_3^- , Fe(III) , Mn(IV) , SO_4^{2-} , CO_2) [Flores Orozco и др., 2019]. Они конкурируют за растворённый водород и ацетат, которые образуются на стадии ферментации в реакциях биоразложения. В исследованиях Gieg и др. [2014] отмечается, что микробиологическое разложение иногда может происходить в присутствии акцепторов электронов, в то время как Irianni-Renno и др. [2016] описывает одновременное восстановление сульфатов и образование метана в одной и той же зоне на основе данных многоуровневого опробования линзы лёгких нефтепродуктов. Акцепторы электронов вызывают последовательное уменьшение и увеличение содержания растворённых веществ, изменяют окислительно-восстановительный потенциал и химический состав подземных и поровых вод. При биodeградации происходит снижение ТАЭ и протекание окислительно-восстановительных реакций, как следствие изменяется концентрация ионов в поровых флюидах. В итоге наблюдаются аномальные эффекты в методах, чувствительных к электропроводности поровых флюидов (например, электротомография, метод вызванного потенциала и георадиолокация), а также к наличию ионно-градиентных и окислительно-восстановительных соединений (например, метод естественного поля).

В работе *Naudet и др.* [2003] отмечается прямая связь между окислительно-восстановительным потенциалом и аномалиями естественного поля, что может сыграть свою роль в идентификации загрязнённых территорий. Однако результаты измерения естественного потенциала могут дать противоречивый результат. Так, в работе *Giampaolo и др.* [2014] в тёплые месяцы над линзой нефтепродуктов наблюдалась положительная аномалия, а в холодные – биполярная. Основываясь на том, что в измеренный потенциал вносят вклад две составляющие (электрокинетический и электрохимический потенциалы), было выдвинуто предположение, что весной большее влияние оказывает электрокинетический потенциал, а осенью – электрохимический.

3.4 Наличие приповерхностных неоднородностей

Наличие приповерхностных неоднородностей (ППН), таких как коммуникации, электрические сети, трубопроводы и т.п. может быть помехой при решении задач по оконтуриванию и определению мощности нефтепродуктового загрязнения. В статье [*Рязанцев и др.*, 2017] говорится о том, что при наличии техногенных помех, оказывающих иногда определяющее влияние на геофизический сигнал, возможно применение малоглубинной геофизики с сохранением информативности результатов, однако при этом возрастает ошибка измерений, а в процессе количественной интерпретации необходимо учитывать информацию о положении источников помех.

3.5 Температура

Исследования *Zeman и др.* [2014] и *Kulkarni и др.* [2017] показали, что вариации температуры играют важную роль в процессах биodeградации нефтепродуктов. *Zeman и др.* [2014] была предложена концептуальная модель, в которой отмечается, что повышение температуры может ускорить метаболизм микробных штаммов и, как следствие, будут наблюдаться увеличение производства биогаза и другие сопутствующие эффекты. Также авторами отмечено, что летом скорость движения газов возрастает на 60%, зимой же мёрзлые почвы препятствуют транспорту газов.

Повышение температуры потенциально может повысить объёмную электропроводность загрязнённой среды. *Atekwana и др.* [2005] задокументировали температуру на 1–6 °C выше в зоне, загрязнённой углеводородами, с аномально более высокой объёмной электропроводностью по сравнению с незагрязнёнными участками. *Che-Alota*

и др. [2009] показывают, что повышенные температуры, связанные с микробной активностью в ареале, загрязнённом лёгкими нефтепродуктами, резко снизились после удаления газов из грунта [*Atekwana и Atekwana*, 2010].

3.6 Эффект «разбитого стекла»

В статьях *Rosenberry и др.* [2006] и *Garg и др.* [2017] этот эффект описывается как сильно изменчивая измеряемая концентрация газов в приповерхностном слое над торфяниками, что не может быть объяснено влиянием таких факторов как, например, температура. Хотя этот эффект, в основном, наблюдался над торфяниками, авторы *Garg и др.* [2017] предполагают, что аналогичный процесс накопления/высвобождения газов может происходить и на участках распространения лёгких нефтепродуктов, что вызовет высокую пространственную и временную изменчивость в измерениях концентрации углеродсодержащих газов *Сарапулова* [2020].

Фактически, при проведении наземных газогеохимических исследований на объектах, загрязнённых нефтепродуктами, всегда наблюдается весьма неоднородное поле концентрации измеряемых газовых компонент с плохой повторяемостью измерений, что заставляет проводить полевые работы по максимально плотной сети наблюдений.

3.7 Влажность и состав грунтов в зоне аэрации

Как следует из рис. 2, в зоне аэрации сосредоточены пути транспортировки газов: метана, углекислого газа (вверх) и кислорода (вниз). Скорость их диффузии контролируется вертикальными градиентами концентрации, которые очень чувствительны к влажности почвы. В местах с неодинаковым увлажнением грунтов коэффициенты диффузии могут различаться на несколько порядков, что затрудняет оценку этого параметра для количественных расчётов скорости движения газов.

В ряде исследований, например, *Sauck* [2000] и *Flores Orozco и др.* [2019], сообщается, что влажность грунта существенно влияет на возможность обнаружения нефтепродуктов геофизическими методами. В условиях сухого климата деятельность микроорганизмов замедляется, но повышается концентрация выщелоченных солей, что приводит к значительному снижению удельного сопротивления грунта. В климате с большим количеством осадков больший вертикальный приток воды приводит к большему смешиванию фильтратов, и, следовательно, менее выраженному снижению удельного электросопротивления.

Кроме того, влажная почва будет являться барьером для вертикальных движений газов. Хорошие результаты могут получиться при условии, что грунты имеют влажность от 8% до 10% для крупнозернистых разновидностей и от 10% до 15% – для мелкозернистых [Smith и др., 2018]. В целом, в крупнозернистых грунтах наблюдается более интенсивное окисление метана, чем в мелкозернистых [Spokas и Bogner, 2011].

Таким образом, процессы, происходящие в зоне аэрации, в большей степени связаны с выделением газа, что отражается в результатах газогеохимии. Воздействие биогаза на результаты электроразведки может заключаться в незначительном увеличении удельного электрического сопротивления (УЭС) вследствие вытеснения почвенной влаги. Однако, поскольку зона аэрации обычно сложена разномерными грунтами, в частности песками, эффект повышенной газонасыщенности редко вызывает заметный рост сопротивления [Sauck, 2000]. Также образование биогенных газов (например, CO_2 , H_2S , H_2 и CH_4) может вызывать изменения реологических свойств загрязнённого региона. В свою очередь, изменение реологических свойств приводит к появлению аномальных эффектов в геофизических данных.

3.8 Колебания уровня грунтовых вод

Ряд исследователей утверждает, что деградация нефтепродуктов вблизи и выше уровня полного водонасыщения контролируется повышением и понижением уровня грунтовых вод, вследствие чего лёгкие нефтепродукты подвергаются активному воздействию кислорода, который поступает с поверхностными стоками. В результате создаются оптимальные условия для протекания микробиологических реакций и, следовательно, образования низкоомного фильтрата [например, Sauck, 2000; Suthersan и др., 2015].

По другим данным, отсутствие кислорода ниже зоны окисления метана и выше зоны распространения нефтепродукта может препятствовать этому процессу, по крайней мере на отдельных территориях. Альтернативный механизм заключается в том, что колебания уровня грунтовых вод могут вымывать накопленные побочные продукты реакции из зоны развития нефтепродуктов и/или привносить микроэлементы, например некоторые металлы [Khan и др., 2004].

В любом случае, изменение уровня грунтовых вод приводит к вертикальному «размыванию» имеющегося поллютанта и, в свою очередь, к изменению свойств грунтов в пределах этой зоны, что отражается на геофизических данных, например, в виде снижения значений УЭС [Sauck, 2000].

3.9 Соотношение лёгких УВ и воздуха в зоне аэрации или воды и УВ в зоне полного водонасыщения

Как отмечалось выше, в грунтах, загрязнённых нефтепродуктами, присутствует зона развития свободной фазы, где происходит смешение флюида с водой и воздухом. В ряде работ показан аномальный эффект от замещения водной фазы и воздуха в поровом пространстве на углеводородную фазу в загрязнённой зоне для «свежих» разливов, в результате чего изменяется электросопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость, увеличивается амплитуда отражений на радарограммах [например, Fiori и др., 2005], что обусловлено высокоомным характером «свежих» нефтеразливов [Atekwana и Atekwana, 2010].

Заполнение углеводородами порового пространства играет важную роль в обнаружении областей разлива нефтепродуктов. Так, согласно статье [Johansson и др., 2015], выделяется несколько типов заполнения лёгкими нефтепродуктами порового пространства, которые влияют на интенсивность мембранной поляризации (рис. 4).

В полевых условиях вышеуказанные модели могут совместно отражаться в результатах геофизических исследований. Факторы, связанные с мембранной поляризацией, в большей степени влияют на методы, изучающие вызванную поляризацию.

3.10 Концентрация УВ

Концентрация углеводородов в грунтах является определяющим фактором, влияющим на значения ряда физических параметров – например, вызванной поляризации. При насыщении грунтов нефтепродуктами (примерно до 92%) [Titov и др., 2004], происходит повышение поляризуемости, а при дальнейшем увеличении концентрации – её снижение [например, Schmutz и др., 2012]. Однако, в исследовании [Martinho и др., 2006] результат получился противоположным. Значения поляризуемости уменьшились ещё до 10%-го насыщения глинистых песков лёгкими нефтепродуктами. Но в целом факт влияния концентрации нефтепродуктов на интенсивность эффекта вызванной поляризации подтверждается.

В исследованиях Wang и др. [2018] показано, что увеличение нефтенасыщенности (>50%) приводит к увеличению амплитуды и снижению частоты отражённого сигнала на радарограммах.

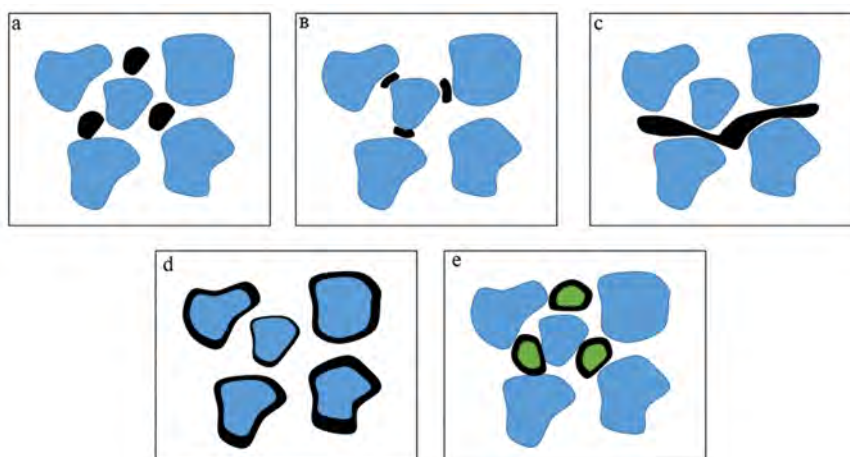


Рис. 4: Концептуальные модели, показывающие возможные варианты остаточного насыщения лёгкими нефтепродуктами порового пространства в водонасыщенной среде (а–d) и в зоне аэрации. Модель а: НП распределяется в порах в виде изолированных капель. Модель b: капли НП задерживаются в порах. Модель с: НП образует непрерывную фазу в нескольких порах. Модель d: НП покрывает минеральное зерно. Модель е: создание оболочки вокруг заполненных воздухом пор за счёт вытеснения водной фазы (воздух обозначен зелёным цветом) [адаптировано на основе *Johansson и др., 2015*].

3.11 Источники нефтепродуктов

Согласно *Sauck [2000]* выделяются следующие категории источников поступления нефтепродуктов в грунт:

1. «Точечный источник», когда техногенное загрязнение происходит из дна резервуара или подземного трубопровода. Такие разливы могут оказывать незначительное влияние на грунты зоны аэрации и практически не будут наблюдаться в геофизических полях.

2. Поверхностные разливы, которые охватывают значительную площадь дневной поверхности. Такой тип разливов будет оказывать большое влияние на свойства грунтов и значительно изменять значения физических параметров.

Наличие углеводородов в геологической среде приводит к появлению на загрязнённом нефтепродуктами участке аномалий электросопротивления, диэлектрической проницаемости, вызванной поляризации и естественного электрического потенциала, в том числе на ранних стадиях загрязнения, как было показано рядом авторов [*DeRyck и др., 2020*]. Наиболее часто при изучении углеводородного загрязнения используются методы сопротивлений – вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электротомография, индуктивные методы и георадиолокация, которые нацелены на выявление аномалий электрического сопротивления (или объёмной электропроводности) и диэлектрической проницаемости.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, степень и характер отражения загрязнённого участка в геофизических полях зависят от множества факторов. Главные из них:

1. Время нахождения нефтепродуктов в грунтах.
2. Деятельность микроорганизмов:
 - 2.1. изменение структуры минералов.
 - 2.2. изменение ионного состава грунтовых вод и поровых флюидов.
3. Окислительно-восстановительные реакции в грунтах и сопутствующие процессы.
4. Наличие приповерхностных неоднородностей.
5. Температура.
6. Эффект «разбитого стекла».
7. Влажность и состав грунтов в зоне аэрации.
8. Колебания уровня грунтовых вод.
9. Соотношение лёгких УВ и воздуха в зоне аэрации или воды и УВ в зоне насыщения.
10. Концентрация УВ.
11. Тип источника нефтепродуктов.

Особенно стоит обратить внимание на время нахождения нефтепродуктов в грунтах, так как от этого зависит степень развития процесса биодegradации и, как следствие, изменения физических характеристик грунтов. Информация по основным факторам, влияющим на результаты геофизических и геохимических исследований, может быть использована интерпретаторами для решения задач параметризации нефтепродуктов в грунтах согласно тем особенностям, которые

встречаются на изучаемых территориях. Также, зная об изменчивости тех или иных факторов, можно предугадать возможные результаты исследований и запланировать оптимальный комплекс методов.

Интегральный подход для оптимизации процессов при решении вопросов интерпретации данных в ряде работ описывается как наиболее применимый [Алексеев и Дашко, 2016; Глазунов и др., 2021; Григорьев и др., 2021]. Разрабатываются новые методические решения по комплексированию геофизических методов в полевых условиях [Miller и др., 2019], создаются новые алгоритмы совместной интерпретации данных нескольких методов [Мовчан и др., 2022; Shestakov и др., 2021]. В свою очередь успешное применение любого геофизического метода на загрязнённых нефтепродуктами участках должно основываться на правильном понимании факторов, определяющих возникновение геофизических аномалий, и того, какой из факторов на рассматриваемой территории будет играть главенствующую роль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев И. В., Дашко Р. Э. К вопросу о роли биокоррозионных процессов в подземной среде мегаполисов // Инженерная геология. — 2016. — № 1. — С. 22–29.
- Глазунов В. В., Агеев А. С., Горелик Г. Д. и др. Результаты комплексных геофизических исследований по поиску склепов на территории загородного некрополя Херсонеса Таврического в Карантинной балке // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 1–9. — DOI: [10.31897/PMI.2021.1.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.2).
- Григорьев Г. С., Салищев М. В., Сенчина Н. П. О применимости способа электромагнитного мониторинга гидроразрыва пласта // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 492–500. — DOI: [10.31897/PMI.2021.4.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.2).
- Гупало В. С. Приоритетные параметры физических процессов в массиве пород при определении безопасности захоронения радиоактивных отходов // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 118. — DOI: [10.31897/pmi.2020.1.118](https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.118).
- Максимович Н. Г., Хайрулина Е. А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды: учебное пособие. — Пермь : Перм. гос. у-т, 2011. — С. 248.
- Мовчан И. Б., Шайгаллямова З. И., Яковлева А. А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — 217–233. — DOI: [10.31897/pmi.2022.23](https://doi.org/10.31897/pmi.2022.23).
- Пашкевич М. А., Бек Д., Матвеева В. А. и др. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 125. — DOI: [10.31897/pmi.2020.1.125](https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125).
- Путилина В. С., Галицкая И. В., Юганова Т. И. Трансформация нефти и нефтепродуктов в почвах, горных породах, подземных водах. Загрязнение, инфильтрация, миграция, деградация. Метаболиты // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. — 2019. — Т. 108. — С. 111.
- Рязанцев П. А., Нилова М. В., Белохвостик Д. М. Мониторинг миграции нефтепродукта в лабораторных условиях с использованием методики электротомографии // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2017. — № 6. — С. 83–94.
- Сарапулова Г. И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. — 2020. — Т. 243. — С. 388. — DOI: [10.31897/pmi.2020.3.388](https://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.388).
- Титов К. В., Ильин Ю. Т., Коносовский П. К. и др. Изменение геофизических свойств загрязнённого нефтепродуктами песка при бактериальном воздействии // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2012. — № 5. — С. 455–469.
- Шулаев Н. С., Пряничникова В. В., Кадыров Р. Р. Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязнённых грунтов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 937–946. — DOI: [10.31897/PMI.2021.6.15](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.15).
- Abdel Aal G. Z., Atekwana E. A., Slater L. D., et al. Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments // Geophysical Research Letters. — 2004. — Vol. 31, no. 12. — P. L12505. — DOI: [10.1029/2004gl020030](https://doi.org/10.1029/2004gl020030).
- Amos R. T., Mayer K. U., Bekins B. A., et al. Use of dissolved and vapor-phase gases to investigate methanogenic degradation of petroleum hydrocarbon contamination in the subsurface // Water Resources Research. — 2005. — Vol. 41, no. 2. — W02001. — DOI: [10.1029/2004WR003433](https://doi.org/10.1029/2004WR003433).
- Atekwana E. A., Atekwana E., Legall F. D., et al. Biodegradation and mineral weathering controls on bulk electrical conductivity in a shallow hydrocarbon contaminated aquifer // Journal of Contaminant Hydrology. — 2005. — Nov. — Vol. 80, no. 3/4. — P. 149–167. — DOI: [10.1016/j.jconhyd.2005.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2005.06.009).

- Atekwana E. A., Atekwana E. A., Rowe R. S., *et al.* The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon // *Journal of Applied Geophysics*. — 2004. — Vol. 56, no. 4. — P. 281–294. — DOI: [10.1016/j.jappgeo.2004.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.08.003).
- Atekwana E. A., Atekwana E. A. Geophysical Signatures of Microbial Activity at Hydrocarbon Contaminated Sites: A Review // *Surveys in Geophysics*. — 2010. — Vol. 31, no. 2. — P. 247–283. — DOI: [10.1007/s10712-009-9089-8](https://doi.org/10.1007/s10712-009-9089-8).
- Che-Alota V., Atekwana E. A., Atekwana E. A., *et al.* Temporal geophysical signatures from contaminant-mass remediation // *Geophysics*. — 2009. — Vol. 74, no. 4. — B113–B123. — DOI: [10.1190/1.3139769](https://doi.org/10.1190/1.3139769).
- Deceuster J., Kaufmann O. Improving the delineation of hydrocarbon-impacted soils and water through induced polarization (IP) tomographies: A field study at an industrial waste land // *Journal of Contaminant Hydrology*. — 2012. — Vol. 136/137. — P. 25–42. — DOI: [10.1016/j.jconhyd.2012.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2012.05.003).
- DeRyck S. M., Redman J. D., Annan A. P. Geophysical Monitoring Of A Controlled Kerosene Spill // 6th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. — DOI: [10.3997/2214-4609-pdb.209.1993_003](https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.209.1993_003).
- Essaid H. I., Bekins B. A., Herkelrath W. N., *et al.* Crude Oil at the Bemidji Site: 25 Years of Monitoring, Modeling, and Understanding // *Ground Water*. — 2011. — Vol. 49, no. 5. — P. 706–726. — DOI: [10.1111/j.1745-6584.2009.00654.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00654.x).
- Fiori A., Benedetto A., Romanelli M. Application of the effective medium approximation for determining water contents through GPR in coarse-grained soil materials // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32, no. 9. — P. L09404. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL022555>.
- Flores Orozco A., Micić V., Bucker M., *et al.* Complex-conductivity monitoring to delineate aquifer pore clogging during nanoparticles injection // *Geophysical Journal International*. — 2019. — June. — Vol. 218, no. 3. — P. 1838–1852. — DOI: [10.1093/gji/ggz255](https://doi.org/10.1093/gji/ggz255).
- Flores Orozco A., Williams K. H., Long P. E., *et al.* Using complex resistivity imaging to infer biogeochemical processes associated with bioremediation of an uranium-contaminated aquifer // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. — 2011. — Vol. 116. — G03001. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2010JG001591>.
- Garg S., Newell C. J., Kulkarni P. R., *et al.* Overview of Natural Source Zone Depletion: Processes, Controlling Factors, and Composition Change // *Groundwater Monitoring & Remediation*. — 2017. — Vol. 37, no. 3. — P. 62–81. — DOI: [10.1111/gwmr.12219](https://doi.org/10.1111/gwmr.12219).
- Giampaolo V., Rizzo E., Titov K., *et al.* Self-potential monitoring of a crude oil-contaminated site (Trecate, Italy) // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2014. — Vol. 21, no. 15. — P. 8932–8947. — DOI: [10.1007/s11356-013-2159-y](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2159-y).
- Gieg L. M., Fowler S. J., Berdugo-Clavijo C. Syntrophic biodegradation of hydrocarbon contaminants // *Current Opinion in Biotechnology*. — 2014. — Vol. 27. — P. 21–29. — (Energy biotechnology, Environmental biotechnology). — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.002>.
- Griebler C., Lueders T. Microbial biodiversity in groundwater ecosystems // *Freshwater Biology*. — 2009. — Vol. 54, no. 4. — P. 649–677. — DOI: [10.1111/j.1365-2427.2008.02013.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02013.x).
- Irianni-Renno M., Akhbari D., Olson M. R., *et al.* Comparison of bacterial and archaeal communities in depth-resolved zones in an LNAPL body // *Applied Microbiology and Biotechnology*. — 2016. — Vol. 100, no. 7. — P. 3347–3360. — DOI: [10.1007/s00253-015-7106-z](https://doi.org/10.1007/s00253-015-7106-z).
- Johansson S., Fiandaca G., Dahlin T. Influence of non-aqueous phase liquid configuration on induced polarization parameters: Conceptual models applied to a time-domain field case study // *Journal of Applied Geophysics*. — 2015. — Vol. 123. — P. 295–309. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.08.010>.
- Khan F. I., Husain T., Hejazi R. An overview and analysis of site remediation technologies // *Journal of Environmental Management*. — 2004. — Vol. 71, no. 2. — P. 95–122. — DOI: [10.1016/j.jenvman.2004.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.02.003).
- Kulkarni P. R., King D. C., McHugh T. E., *et al.* Impact of Temperature on Groundwater Source Attenuation Rates at Hydrocarbon Sites // *Groundwater Monitoring & Remediation*. — 2017. — Vol. 37, no. 3. — P. 82–93. — DOI: [10.1111/gwmr.12226](https://doi.org/10.1111/gwmr.12226).
- Martinho E., Almeida F., Senos Matias M. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements // *Journal of Applied Geophysics*. — 2006. — Vol. 60, no. 1. — P. 27–40. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.11.003>.
- Meckenstock R. U., Netzer F. von, Stumpp C., *et al.* Water droplets in oil are microhabitats for mi-

- crobial life // *Science*. — 2014. — Vol. 345, no. 6197. — P. 673–676. — DOI: [10.1126/science.1252215](https://doi.org/10.1126/science.1252215).
- Mellage A., Smeaton C. M., Furman A., *et al.* Linking Spectral Induced Polarization (SIP) and Sub-surface Microbial Processes: Results from Sand Column Incubation Experiments // *Environmental Science & Technology*. — 2018. — Vol. 52, no. 4. — P. 2081–2090. — DOI: [10.1021/acs.est.7b04420](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04420).
- Miller A. A., Gorelik G. D., Budanov L. M. Substantiation of the Optimal Gis Complex for the Allocation of Water-Containing Reservoirs on the Example of the Analysis of Well Logging Results in the Leningrad Region. — 2019. — DOI: [10.3997/2214-4609.201901693](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901693).
- Naudet V., Revil A., Bottero J.-Y., *et al.* Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater // *Geophysical Research Letters*. — 2003. — Vol. 30, no. 21. — P. 2091. — DOI: [10.1029/2003GL018096](https://doi.org/10.1029/2003GL018096).
- Ng G.-H. C., Bekins B. A., Cozzarelli I. M., *et al.* Reactive transport modeling of geochemical controls on secondary water quality impacts at a crude oil spill site near Bemidji, MN // *Water Resources Research*. — 2015. — Vol. 51, no. 6. — P. 4156–4183. — DOI: [10.1002/2015WR016964](https://doi.org/10.1002/2015WR016964).
- Ntarlagiannis D., Yee N., Slater L. On the low-frequency electrical polarization of bacterial cells in sands // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32, no. 24. — P. L24402. — DOI: [10.1029/2005GL024751](https://doi.org/10.1029/2005GL024751).
- Rosenberry D. O., Glaser P. H., Siegel D. I. The hydrology of northern peatlands as affected by biogenic gas: current developments and research needs // *Hydrological Processes*. — 2006. — Vol. 20, no. 17. — P. 3601–3610. — DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6377>.
- Sauk W. A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments // *Journal of Applied Geophysics*. — 2000. — Vol. 44, no. 2. — P. 151–165. — DOI: [10.1016/S0926-9851\(99\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00021-X).
- Schmutz M., Blondel A., Revil A. Saturation dependence of the quadrature conductivity of oil-bearing sands // *Geophysical Research Letters*. — 2012. — Vol. 39, no. 3. — P. L03402. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GL050474>.
- Shestakov A. K., Sadykov R. M., Petrov P. A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell // *E3S Web Conf.* — 2021. — Vol. 266. — P. 09002. — DOI: [10.1051/e3sconf/202126609002](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126609002).
- Smith K. A., Ball T., Conen F., *et al.* Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes // *European Journal of Soil Science*. — 2018. — Vol. 69, no. 1. — P. 10–20. — DOI: [10.1111/ejss.12539](https://doi.org/10.1111/ejss.12539).
- Spokas K. A., Bogner J. E. Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils // *Waste Management*. — 2011. — Vol. 31, no. 5. — P. 823–832. — DOI: [10.1016/j.wasman.2009.12.018](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.12.018). — Landfill Gas Emission and Mitigation.
- Suthersan S., Koons B., Schnobrich M. Contemporary Management of Sites with Petroleum LNAPL Presence // *Groundwater Monitoring & Remediation*. — 2015. — Vol. 35, no. 1. — P. 23–29. — DOI: [10.1111/gwmr.12099](https://doi.org/10.1111/gwmr.12099).
- Titov K., Kemna A., Tarasov A., *et al.* Induced Polarization of Unsaturated Sands Determined through Time Domain Measurements // *Vadose Zone Journal*. — 2004. — Vol. 3, no. 4. — P. 1160–1168. — DOI: [10.2136/vzj2004.1160](https://doi.org/10.2136/vzj2004.1160).
- Wang Y.-y., Guo X.-j., Shao S., *et al.* Abnormal features analysis and status evaluation for oil contaminated site in capillary zone based on ground penetrating radar // *Progress in Geophysics*. — 2018. — Vol. 33, no. 5. — P. 2172–2180. — DOI: [10.6038/pg2018BB0365](https://doi.org/10.6038/pg2018BB0365).
- Yang M., Yang Y. S., Du X., *et al.* Fate and Transport of Petroleum Hydrocarbons in Vadose Zone: Compound-specific Natural Attenuation // *Water, Air, & Soil Pollution*. — 2013. — Vol. 224, no. 3. — P. 1439. — DOI: [10.1007/s11270-013-1439-y](https://doi.org/10.1007/s11270-013-1439-y).
- Zeman N. R., Irianni Renno M., Olson M. R., *et al.* Temperature impacts on anaerobic biotransformation of LNAPL and concurrent shifts in microbial community structure // *Biodegradation*. — 2014. — Vol. 25, no. 4. — P. 569–585. — DOI: [10.1007/s10532-014-9682-5](https://doi.org/10.1007/s10532-014-9682-5).

STUDY OF THE INFLUENCE OF FACTORS DETERMINING THE RESULTS OF GEOPHYSICAL SURVEYS IN TERRITORIES CONTAMINATED WITH LIGHT NON-AQUEOUS PHASE LIQUID

T. Mingaleva¹, S. Shakuro², A. Egorov¹

¹Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

²LLC “FRONT Geology”, Nizhny Novgorod, Russia

*Correspondent author: tatiana.mingaleva@bk.ru

Received 25 December 2022; accepted 26 January 2023; published 8 February 2023

To solve environmental problems in the search for hydrocarbon pollution, geophysics is often used. In contaminated sites, knowledge of the geological structure and hydrogeological conditions, as well as the qualitative and quantitative characteristics of pollution, is essential for risk assessment and site remediation planning. The article discusses the influence of various factors on the formation of anomalies detected by methods of shallow geophysics in the process of studying the pollution of the geological environment with oil products. The main purpose of such work is the detection, contouring and determination of the migration routes of light oil products. Understanding the processes occurring in the subsurface space during the distribution of oil products helps to correctly compare the variations in physical properties identified from geophysical data and the location of contaminated areas. One of the main factors affecting the results of geophysical surveys is the residence time of oil products in soils. The nature of geophysical anomalies changes and is a response from a complex multifactorial environment. Also, among the factors affecting the nature of geophysical anomalies, the following can be distinguished: the activity of microorganisms, redox reactions, the presence of near-surface heterogeneities, temperature, signal shredding, humidity and composition of soils in the aeration zone, fluctuations in the level of groundwater, the concentration of hydrocarbons, source of petroleum products. The paper also describes several generalized models of the distribution of hydrocarbon pollution, each of which can be used to solve the tasks set, and also be a useful tool for predicting the distribution of oil products and modeling geophysical responses from a multifactorial environment. At present, the most popular model is the “natural source zone depletion”, according to which methanogenesis plays an important role in technogenically polluted territories, as a result of which gases in anomalous concentrations are released from areas where hydrocarbons are processed by microorganisms as secondary waste products of bacteria. The authors also consider a model that is more typical for objects located on the banks of rivers or lakes. Here, the distribution model of light oil products is subdivided into three zones (donor zone, transit zone, and secondary accumulation zone), in which the processes of distribution and accumulation of oil products take place. Thus, a comprehensive study of the processes occurring in soils during oil spills and the use of theoretical models of pollutant migration can facilitate the work on the ecological study of soils contaminated with oil products.

Keywords: light non-aqueous phase liquid (LNAPL), shallow geophysics, microbe, hydrogeology, underground space, monitoring.

Citation: Mingaleva, T., S. Shakuro, and A. Egorov (2023), Study of the Influence of Factors Determining the Results of Geophysical Surveys in Territories Contaminated with light non-aqueous phase liquid, *Russian Journal of Earth Sciences*, v. 23, ES1002, 10.2205/2023ES000831.

REFERENCES

- Abdel Aal G. Z., Atekwana E. A., Slater L. D., *et al.* Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments // *Geophysical Research Letters*. — 2004. — Vol. 31, no. 12. — P. L12505. — DOI: [10.1029/2004gl020030](https://doi.org/10.1029/2004gl020030).
- Alekseev I. V., Dashko R. E. To the question of the role of biocorrosion processes in the underground environment of megacities // *Engineering Geology*. — 2016. — No. 1. — P. 22–29.

- Amos R. T., Mayer K. U., Bekins B. A., *et al.* Use of dissolved and vapor-phase gases to investigate methanogenic degradation of petroleum hydrocarbon contamination in the subsurface // *Water Resources Research*. — 2005. — Vol. 41, no. 2. — W02001. — DOI: [10.1029/2004WR003433](https://doi.org/10.1029/2004WR003433).
- Atekwana E. A., Atekwana E., Legall F. D., *et al.* Biodegradation and mineral weathering controls on bulk electrical conductivity in a shallow hydrocarbon contaminated aquifer // *Journal of Contaminant Hydrology*. — 2005. — Nov. — Vol. 80, no. 3/4. — P. 149–167. — DOI: [10.1016/j.jconhyd.2005.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2005.06.009).
- Atekwana E. A., Atekwana E. A., Rowe R. S., *et al.* The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon // *Journal of Applied Geophysics*. — 2004. — Vol. 56, no. 4. — P. 281–294. — DOI: [10.1016/j.jappgeo.2004.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.08.003).
- Atekwana E. A., Atekwana E. A. Geophysical Signatures of Microbial Activity at Hydrocarbon Contaminated Sites: A Review // *Surveys in Geophysics*. — 2010. — Vol. 31, no. 2. — P. 247–283. — DOI: [10.1007/s10712-009-9089-8](https://doi.org/10.1007/s10712-009-9089-8).
- Che-Alota V., Atekwana E. A., Atekwana E. A., *et al.* Temporal geophysical signatures from contaminant-mass remediation // *Geophysics*. — 2009. — Vol. 74, no. 4. — B113–B123. — DOI: [10.1190/1.3139769](https://doi.org/10.1190/1.3139769).
- Deceuster J., Kaufmann O. Improving the delineation of hydrocarbon-impacted soils and water through induced polarization (IP) tomographies: A field study at an industrial waste land // *Journal of Contaminant Hydrology*. — 2012. — Vol. 136/137. — P. 25–42. — DOI: [10.1016/j.jconhyd.2012.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2012.05.003).
- DeRyck S. M., Redman J. D., Annan A. P. Geophysical Monitoring Of A Controlled Kerosene Spill // 6th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. — DOI: [10.3997/2214-4609-pdb.209.1993_003](https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.209.1993_003).
- Essaid H. I., Bekins B. A., Herkelrath W. N., *et al.* Crude Oil at the Bemidji Site: 25 Years of Monitoring, Modeling, and Understanding // *Ground Water*. — 2011. — Vol. 49, no. 5. — P. 706–726. — DOI: [10.1111/j.1745-6584.2009.00654.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00654.x).
- Fiori A., Benedetto A., Romanelli M. Application of the effective medium approximation for determining water contents through GPR in coarse-grained soil materials // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32, no. 9. — P. L09404. — DOI: [10.1029/2005GL022555](https://doi.org/10.1029/2005GL022555).
- Flores Orozco A., Micić V., Bucker M., *et al.* Complex-conductivity monitoring to delineate aquifer pore clogging during nanoparticles injection // *Geophysical Journal International*. — 2019. — June. — Vol. 218, no. 3. — P. 1838–1852. — DOI: [10.1093/gji/ggz255](https://doi.org/10.1093/gji/ggz255).
- Flores Orozco A., Williams K. H., Long P. E., *et al.* Using complex resistivity imaging to infer biogeochemical processes associated with bioremediation of an uranium-contaminated aquifer // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. — 2011. — Vol. 116. — G03001. — DOI: [10.1029/2010JG001591](https://doi.org/10.1029/2010JG001591).
- Garg S., Newell C. J., Kulkarni P. R., *et al.* Overview of Natural Source Zone Depletion: Processes, Controlling Factors, and Composition Change // *Groundwater Monitoring & Remediation*. — 2017. — Vol. 37, no. 3. — P. 62–81. — DOI: [10.1111/gwmr.12219](https://doi.org/10.1111/gwmr.12219).
- Giampaolo V., Rizzo E., Titov K., *et al.* Self-potential monitoring of a crude oil-contaminated site (Trecate, Italy) // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2014. — Vol. 21, no. 15. — P. 8932–8947. — DOI: [10.1007/s11356-013-2159-y](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2159-y).
- Gieg L. M., Fowler S. J., Berdugo-Clavijo C. Syntrophic biodegradation of hydrocarbon contaminants // *Current Opinion in Biotechnology*. — 2014. — Vol. 27. — P. 21–29. — (Energy biotechnology, Environmental biotechnology). — DOI: [10.1016/j.copbio.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.002).
- Glazunov V. V., Ageev A. S., Gorelik G. D., *et al.* Results of comprehensive geophysical research on the search for crypts on the territory of the out-of-town necropolis of Tauric Chersonese in Karantinaya Balka // *Notes of the Mining Institute*. — 2021. — Vol. 247. — P. 1–9. — DOI: [10.31897/PMI.2021.1.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.2).
- Griebler C., Lueders T. Microbial biodiversity in groundwater ecosystems // *Freshwater Biology*. — 2009. — Vol. 54, no. 4. — P. 649–677. — DOI: [10.1111/j.1365-2427.2008.02013.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02013.x).
- Grigoriev G. S., Salishchev M. V., Senchina N. P. On the applicability of the method of electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing // *Notes of the Mining Institute*. — 2021. — Vol. 250. — P. 492–500. — DOI: [10.31897/PMI.2021.4.2](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.2).
- Gupalo V. S. Priority parameters of physical processes in the rock mass when determining the safety of radioactive waste disposal // *Notes of the Mining Institute*. — 2020. — Vol. 241. — P. 118. — DOI: [10.31897/pmi.2020.1.118](https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.118).
- Irianni-Renno M., Akhbari D., Olson M. R., *et al.* Comparison of bacterial and archaeal communities in depth-resolved zones in an LNAPL body // *Applied Microbiology and Biotechnology*. — 2016. —

- Vol. 100, no. 7. — P. 3347–3360. — DOI: [10.1007/s00253-015-7106-z](https://doi.org/10.1007/s00253-015-7106-z).
- Johansson S., Fiandaca G., Dahlin T. Influence of non-aqueous phase liquid configuration on induced polarization parameters: Conceptual models applied to a time-domain field case study // *Journal of Applied Geophysics*. — 2015. — Vol. 123. — P. 295–309. — DOI: [10.1016/j.jappgeo.2015.08.010](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.08.010).
- Khan F. I., Husain T., Hejazi R. An overview and analysis of site remediation technologies // *Journal of Environmental Management*. — 2004. — Vol. 71, no. 2. — P. 95–122. — DOI: [10.1016/j.jenvman.2004.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.02.003).
- Kulkarni P. R., King D. C., McHugh T. E., *et al.* Impact of Temperature on Groundwater Source Attenuation Rates at Hydrocarbon Sites // *Groundwater Monitoring & Remediation*. — 2017. — Vol. 37, no. 3. — P. 82–93. — DOI: [10.1111/gwmr.12226](https://doi.org/10.1111/gwmr.12226).
- Martinho E., Almeida F., Senos Matias M. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements // *Journal of Applied Geophysics*. — 2006. — Vol. 60, no. 1. — P. 27–40. — DOI: [10.1016/j.jappgeo.2005.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.11.003).
- Maximovich N. G., Khairulina E. A. Geochemical barriers and environmental protection: a tutorial. — Perm : perm. state at-t., 2011. — P. 248.
- Meckenstock R. U., Netzer F. von, Stumpp C., *et al.* Water droplets in oil are microhabitats for microbial life // *Science*. — 2014. — Vol. 345, no. 6197. — P. 673–676. — DOI: [10.1126/science.1252215](https://doi.org/10.1126/science.1252215).
- Mellage A., Smeaton C. M., Furman A., *et al.* Linking Spectral Induced Polarization (SIP) and Sub-surface Microbial Processes: Results from Sand Column Incubation Experiments // *Environmental Science & Technology*. — 2018. — Vol. 52, no. 4. — P. 2081–2090. — DOI: [10.1021/acs.est.7b04420](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04420).
- Miller A. A., Gorelik G. D., Budanov L. M. Substantiation of the Optimal Gis Complex for the Allocation of Water-Containing Reservoirs on the Example of the Analysis of Well Logging Results in the Leningrad Region. — 2019. — DOI: [10.3997/2214-4609.201901693](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901693).
- Movchan I. B., Shaygallyamova Z. I., Yakovleva A. A. Identification of factors of structural control of primary gold occurrences by the method of unmanned aeromagnetic exploration on the example of the Neryungri region of Yakutia // *Notes of the Mining Institute*. — 2022. — Vol. 254. — P. 217233. — DOI: [10.31897/PMI.2022.23](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23).
- Naudet V., Revil A., Bottero J.-Y., *et al.* Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater // *Geophysical Research Letters*. — 2003. — Vol. 30, no. 21. — P. 2091. — DOI: [10.1029/2003GL018096](https://doi.org/10.1029/2003GL018096).
- Ng G.-H. C., Bekins B. A., Cozzarelli I. M., *et al.* Reactive transport modeling of geochemical controls on secondary water quality impacts at a crude oil spill site near Bemidji, MN // *Water Resources Research*. — 2015. — Vol. 51, no. 6. — P. 4156–4183. — DOI: [10.1002/2015WR016964](https://doi.org/10.1002/2015WR016964).
- Ntarlagiannis D., Yee N., Slater L. On the low-frequency electrical polarization of bacterial cells in sands // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32, no. 24. — P. L24402. — DOI: [10.1029/2005GL024751](https://doi.org/10.1029/2005GL024751).
- Pashkevich M. A., Beck J., Matveeva V. A., *et al.* Biogeochemical assessment of the state of the soil and vegetation cover in industrial, residential and recreational areas of St. Petersburg // *Notes of the Mining Institute*. — 2020. — Vol. 241. — P. 125. — DOI: [10.31897/pmi.2020.1.125](https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125).
- Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. Transformation of oil and oil products in soils, rocks, underground waters. Pollution, infiltration, migration, degradation. Metabolites // *Ecology*. — 2019. — Vol. 108. — P. 111. — (A Series of Analytical Reviews of World Literature).
- Rosenberry D. O., Glaser P. H., Siegel D. I. The hydrology of northern peatlands as affected by biogenic gas: current developments and research needs // *Hydrological Processes*. — 2006. — Vol. 20, no. 17. — P. 3601–3610. — DOI: [10.1002/hyp.6377](https://doi.org/10.1002/hyp.6377).
- Ryazantsev P. A., Nilova M. V., Belokhovostik D. M. Monitoring of oil product migration in laboratory conditions using electrotomography technique // *Geocology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*. — 2017. — No. 6. — P. 83–94.
- Sarapulova G. I. Geochemical approach in assessing the impact of technogenic objects on soils // *Notes of the Mining Institute*. — 2020. — Vol. 243. — P. 388. — DOI: [10.31897/pmi.2020.3.388](https://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.388).
- Sauk W. A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments // *Journal of Applied Geophysics*. — 2000. — Vol. 44, no. 2. — P. 151–165. — DOI: [10.1016/S0926-9851\(99\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00021-X).
- Schmutz M., Blondel A., Revil A. Saturation dependence of the quadrature conductivity of oil-bearing sands // *Geophysical Research Letters*. — 2012. — Vol. 39, no. 3. — P. L03402. — DOI: [10.1029/2011GL050474](https://doi.org/10.1029/2011GL050474).
- Shestakov A. K., Sadykov R. M., Petrov P. A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell // *E3S Web Conf.* — 2021. — Vol. 266. — P. 09002. — DOI: [10.1051/e3sconf/202126609002](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126609002).

- Shulaev N. S., Pryanichnikova V. V., Kadyrov R. R. Regularities of electrochemical cleaning of oil-contaminated soils // Notes of the Mining Institute. — 2021. — Vol. 252. — P. 937–946. — DOI: [10.31897/PMI.2021.6.15](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.15).
- Smith K. A., Ball T., Conen F., *et al.* Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes // European Journal of Soil Science. — 2018. — Vol. 69, no. 1. — P. 10–20. — DOI: [10.1111/ejss.12539](https://doi.org/10.1111/ejss.12539).
- Spokas K. A., Bogner J. E. Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils // Waste Management. — 2011. — Vol. 31, no. 5. — P. 823–832. — DOI: [10.1016/j.wasman.2009.12.018](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.12.018).
- Suthersan S., Koons B., Schnobrich M. Contemporary Management of Sites with Petroleum LNAPL Presence // Groundwater Monitoring & Remediation. — 2015. — Vol. 35, no. 1. — P. 23–29. — DOI: [10.1111/gwmr.12099](https://doi.org/10.1111/gwmr.12099).
- Titov K., Kemna A., Tarasov A., *et al.* Induced Polarization of Unsaturated Sands Determined through Time Domain Measurements // Vadose Zone Journal. — 2004. — Vol. 3, no. 4. — P. 1160–1168. — DOI: [10.2136/vzj2004.1160](https://doi.org/10.2136/vzj2004.1160).
- Titov K. V., Ilyin Y. T., Konosavsky P. K., *et al.* Change in the geophysical properties of oil-contaminated sand under bacterial impact // Geocology, engineering geology, hydrogeology, geocryology. — 2012. — No. 5. — P. 455–469.
- Wang Y.-Y., Guo X.-J., Shao S., *et al.* Abnormal features analysis and status evaluation for oil contaminated site in capillary zone based on ground penetrating radar // Progress in Geophysics. — 2018. — Vol. 33, no. 5. — P. 2172–2180. — DOI: [10.6038/pg2018BB0365](https://doi.org/10.6038/pg2018BB0365).
- Yang M., Yang Y. S., Du X., *et al.* Fate and Transport of Petroleum Hydrocarbons in Vadose Zone: Compound-specific Natural Attenuation // Water Air Soil Pollut. — 2013. — Vol. 224, no. 3. — P. 1439. — DOI: [10.1007/s11270-013-1439-y](https://doi.org/10.1007/s11270-013-1439-y).
- Zeman N. R., Irianni Renno M., Olson M. R., *et al.* Temperature impacts on anaerobic biotransformation of LNAPL and concurrent shifts in microbial community structure // Biodegradation. — 2014. — Vol. 25, no. 4. — P. 569–585. — DOI: [10.1007/s10532-014-9682-5](https://doi.org/10.1007/s10532-014-9682-5).