

УДК 550.837.3; 550.8.014; 504.064.3

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ХАРАКТЕР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НЕФТЕХРАНИЛИЩ В ДОЛИНЕ РЕКИ ВОЛГИ

Мингалева Татьяна Андреевна¹,
tatiana.mingaleva@bk.ru

Шакуро Сергей Владимирович²,
s.shakuro@gmail.com

Егоров Алексей Сергеевич¹,
egorov_as@pers.spmi.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, ул. 21-я линия В.О., 2.

² ООО «ФРОНТ геология»,
Россия, 603032, г. Нижний Новгород, ул. Героя Чугунова, 13.

Актуальность исследования обусловлена тем, что загрязнение грунтов нефтепродуктами имеет сложный динамичный характер в пространственно-временной области. Поэтому физические свойства грунтов при решении геофизических задач по оконтуриванию и определению мощности загрязнения могут под действием различных факторов меняться, расширяя круг поисковых признаков загрязнения. Определение физических параметров для участков, загрязненных нефтепродуктами, может помочь в дальнейшей эффективной параметризации углеводородного загрязнения в схожих геологических условиях.

Цель: обоснование построения обобщенной модели с указанием физических свойств грунтов территорий нефтебаз длительной эксплуатации (удельным электрическим сопротивлением, продольными и поперечными скоростями) для использования данных в последующих работах по рекультивации или повторном извлечении продукта.

Методы: анализ литературных источников по теме исследования; обработка и интерпретация полевого геофизического материала для нефтебаз, расположенных на берегу реки Волги; построение обобщенной модели с описанием физических характеристик грунтов по результатам геофизических исследований.

Результаты. Выполненные исследования характера загрязнения грунтов двух нефтебаз в районе реки Волги с привлечением материалов, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, позволили обосновать параметры обобщенной физико-геологической модели загрязнения грунтов нефтебаз. В общем случае распределение ареалов загрязнения подчиняется особенностям геологического строения и гидрогеологического режима рассматриваемых площадей и включает пять зон (верхний ареал, ареал загрязнения над безнапорным горизонтом, ареал просачивания в гидрогеологическом окне, ареал загрязнения грунтовых вод, зона вторичного накопления). Эта модель может использоваться для прогнозирования характера загрязнения грунтов, подстилающих резервуарные парки, сливно-наливные пункты, ремонтные мастерские автомашин, моечные площадки и автозаправочные станции и расположенных вблизи речных и озерных бассейнов. Модель распределения нефтепродуктов в грунтах будет иметь сложный характер, что также будет выражаться в геофизических разрезах.

Ключевые слова:

Легкие нефтепродукты, моделирование загрязнения нефтепродуктами, электроразведка, сейсморазведка, нефтебазы.

Введение

Загрязнение нефтепродуктами геологической среды на нефтехранилищах является актуальной экологической проблемой нашего времени. Нефтепродукты, излившиеся в грунты, не только загрязняют почвенный слой, но и резко ухудшают качество подземных вод. Эти продукты обычно представляют собой многокомпонентные органические смеси, состоящие из химических веществ с различной степенью растворимости в воде. Основными нефтепродуктами-загрязнителями являются органические соединения, такие как хлорированные углеводороды, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), ароматические углеводороды (например, группа БТЭК: бензол, толуол, этилбензол и ксилол, фенолы и т. д.). Некоторые соединения (например, спирты) хорошо растворимы в воде. Другие компоненты (бензол, толуол, этилбензол и ксилолы) малорастворимы.

Загрязнению нефтепродуктами подвержены все компоненты геологической среды: почвы, грунты зо-

ны аэрации, грунты зоны водонасыщения, подземные и поверхностные воды. Почвы и грунты считаются загрязненными, если концентрация нефтепродуктов достигает величин, при которых в природных комплексах проявляются негативные экологические последствия.

Нефтепродукты, относящиеся к категории несмешивающихся с водой жидкостей (НВЖ), являются главными техногенными загрязнителями территорий нефтебаз. Различия в физических и химических свойствах воды и НВЖ приводят к образованию поверхностной раздела между жидкостями, препятствующими их смешиванию [1]. НВЖ, обладающая пониженной плотностью, формирует так называемую лёгкую безводную жидкость (лёгкие нефтепродукты), которая в английской литературе обозначается как LNAPL – light non-aqueous phase liquid [2, 3]. Согласно определению, LNAPL имеет меньшую плотность, чем вода, в отличие от DNAPL (dense non-aqueous phase liquid – тяжёлая («плотная») безводная жид-

кость), плотность которой выше, чем у воды. Как только LNAPL проникает в грунт, она локализуется выше уровня грунтовых вод, что отвечает его пониженной плотности.

В связи с колебанием уровня грунтовых вод с течением времени LNAPL могут достигать более глубоких зон. Углеводороды (например, керосин), относящиеся к категории «неполярных» соединений [4], образуют несмешивающиеся дискретные капли, не имеющие прямого контакта с поверхностью зерна внутри пор, заполненных водой. LNAPL представляют собой нерастворимую фазу, если в почве в виде твердой фазы отсутствуют фракции органического вещества.

За последнее время геофизические исследования проводились на различных загрязненных нефтепродуктами участках [5–7]. Для дальнейшего понимания эволюции загрязнения в недрах в рамках этих исследований проводилась регистрация изменения физических параметров загрязненных грунтов в мониторинговом режиме [8, 9]. Несмотря на большое количество исследований, связанных с изучением поведения различных физических параметров ареалов загрязнений, процессы формирования загрязнения и морфология разнотипных зон по-прежнему остаются неоднозначными. Опыт геофизических исследований показывает, что применение одного и того же метода на разных участках и даже в разных местах одного и того же участка может привести к совершенно разным результатам. Это в первую очередь связано с тем, что характеристики загрязнения изменяются в пространстве и во времени, что влияет на их физические параметры. Это обстоятельство не может не учитываться при проведении интерпретационных построений.

Причинами изменения физических величин могут являться микробные процессы, которые глубоко изменяют загрязненную среду, вызывая заметные изменения физических свойств, состава и концентрации растворенных углеводородов в поровых флюидах.

Поступление нефтяных углеводородов в подземную среду начинается со стадии их добычи и продолжается на всех последующих этапах их транспортировки, переработки, хранения и использования. В пределах городских территорий поступление углеводородов в грунтовую толщу связано с деятельностью резервуарных парков, сливно-наливных пунктов, ремонтных мастерских автомашин, моечных площадок и автозаправочных станций (АЗС). Одними из крупнейших источников загрязнения геологической среды углеводородами являются нефтехранилища или нефтебазы. Сеть нефтебаз покрывает большую часть территории России. В большинстве случаев они располагаются вблизи крупных рек, что определяется их транспортной доступностью. Многие базы хранения нефтепродуктов эксплуатируются в течение многих десятилетий. За такой длительный срок загрязнение успевает распространиться не только на приповерхностной части, но и по всему геологическому разрезу вплоть до водоносного горизонта. В последнее время на территориях нефтебаз растет запрос на исследования с целью определения ареалов загрязне-

ния нефтепродуктами для их дальнейшего повторного использования либо с целью рекультивации контаминанта. Для успешного решения поставленной цели необходимо иметь представления о площади распространения нефтепродуктов в грунтах и мощности загрязнения. Проблема параметризации ареалов загрязнения нефтепродуктами почвенных грунтов нефтебаз до конца не решена. Авторами предлагается обобщенная модель строения такого рода объектов, выполненная на основе обобщения данных с территорий нефтебаз, расположенных на берегу реки Волги, и составление физико-геологической модели грунтов нефтебаз для понимания поисковых признаков загрязнения, что особенно важно в условиях длительной эксплуатации нефтебаз.

Модели миграции нефтепродуктов в грунтах нефтебаз

При попадании на дневную поверхность нефтепродукты будут мигрировать вниз под действием силы тяжести. При небольшом объеме загрязняющего вещества, излившегося в грунт, фронт его будет перемещаться через ненасыщенную зону, где часть углеводорода будет удерживаться капиллярными силами в виде остаточных капель в порах почвы, тем самым истощая прилегающую массу нефтепродуктов до тех пор, пока движение не прекратится. При большем объеме контаминанта миграция будет продолжаться до тех пор, пока загрязнитель не встретит физический барьер (например, пласты с низкой проницаемостью) или не подвергнется воздействию выталкивающей силы вблизи уровня грунтовых вод. Как только капиллярная полоса достигнута, LNAPL может перемещаться вдоль нее в виде непрерывного слоя.

Основная миграция углеводородов происходит по направлению максимального понижения уровня грунтовых вод, и со временем контаминант достигает зоны разгрузки подземных вод, загрязняя водоемы в близлежащих районах. Ограниченные объемы загрязнений первоначально могут мигрировать в других направлениях [1]. По мере того, как LNAPL приближается к уровню грунтовых вод, может начаться боковая миграция, которая контролируется распределением основной массы нефтепродуктов. Большая масса углеводородов может гидростатически подавлять капиллярную кайму и понижать уровень грунтовых вод. В случае если источник загрязнения удаляется, гидростатическое давление понижается и уровень грунтовых вод в конечном итоге восстанавливается.

На миграцию нефтепродуктов большое влияние оказывает геологическое и гидрогеологическое строение района нефтехранилищ. В частности, подповерхностная среда может иметь сложный характер распределения слоев. Например, нефтепродукты (НП) могут преимущественно мигрировать в боковом направлении по более проницаемым путям или накапливаться и мигрировать вдоль слоев с низкой проницаемостью над уровнем грунтовых вод (рис. 1).

Опыт авторов в исследовании загрязненных нефтепродуктами грунтов в прибрежных районах реки Волги показывает, что геологическое и гидрогео-

логическое строение может иметь более сложный характер. Само загрязнение может обнаруживаться ниже водоупорного слоя (суглинков), что требует дополнительных геофизических исследований.

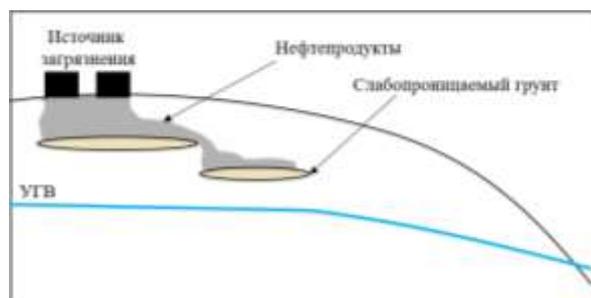


Рис. 1. Схема распространения нефтепродуктов в геологической среде с линзами слабопроницаемых грунтов до момента достижения НП уровня грунтовых вод (УГВ) (на основе [1])

Fig. 1. Scheme of LNAPL distribution in the geological environment with lenses of low-permeability soils until the moment when the contaminant reaches the ground-water level (based on [1])

Модель миграции углеводородов в грунтах прибрежной зоны верней и центральной Волги

В распоряжении авторов имеется материал по изучению двух нефтебаз в рассматриваемых регионах.

Первая из них расположена в Самарской области на берегу канала, примыкающего к реке Волге (рис. 2).

Первые выходы нефтепродуктов в канал были зарегистрированы еще в прошлом веке. Для решения проблемы загрязнения грунтов, подстилающих территорию нефтебазы, был разработан проект повторной добычи углеводородов из зон загрязнения и очистки грунтов и подземных вод. В ходе проекта со-

здана сеть добывающих скважин. Скважины пробурены в непосредственной близости от канала на расстоянии от 85 до 120 м от берега. На сегодняшний день проект утратил актуальность, так как притоки нефтепродуктов в добывающие скважины сократились до минимума, а выходы углеводородов на берегу канала не прекратились. В настоящее время нефтебаза законсервирована.

Строение верхней части разреза относительно простое: под техногенными грунтами и песками суммарной мощностью 2–5 м залегает слой суглинков мощностью в несколько метров, под которым снова обнаруживаются мелко- и среднезернистые пески, вмещающие первый от поверхности водоносный горизонт. Зеркало грунтовых вод в пределах участка претерпевает значительные сезонные колебания и залегает на глубинах 9–15 м.

По результатам предшествующих исследований и режимных наблюдений известен сложный характер углеводородного загрязнения территории, прилегающей к нефтебазе, который обусловлен множеством осложняющих факторов: наличием верховодки, значительными сезонными колебаниями уровней грунтовых вод, вариациями фильтрационных свойств водовмещающих и водоупорных пород.

На этой площади выполнены электроразведочные работы методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), электротомографии (ЭТ), сейморазведки методом преломленных волн (МПВ). Дополнительно к геофизическому комплексу проводились газогеохимические съемки (суммарная концентрация CH_4 , CO_2 , O_2).

Геоэлектрический и сейсмический (МПВ) разрезы отработаны в направлении с севера на юг (рис. 3, 4).

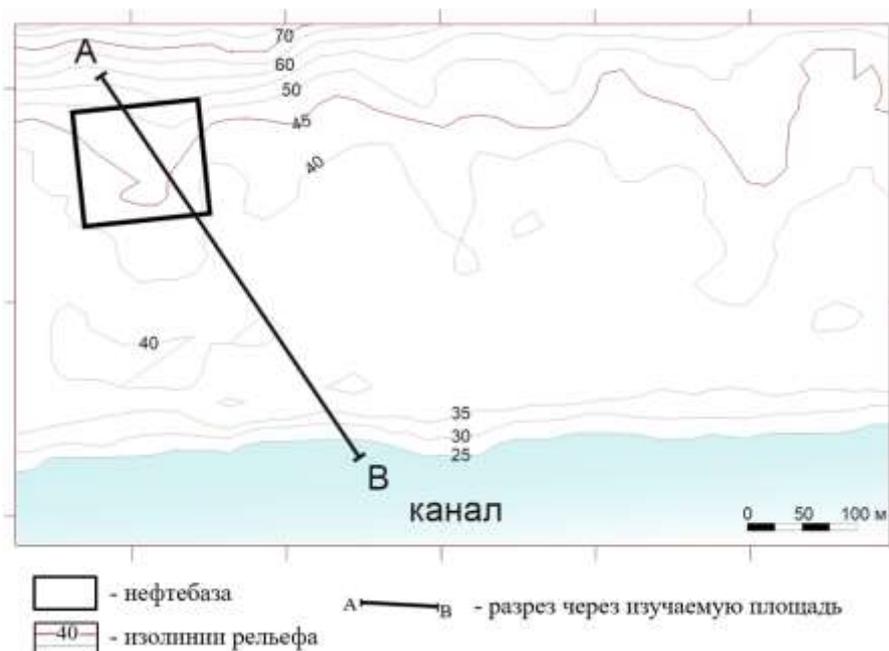


Рис. 2. Схема расположения нефтебазы в Саратовской области в прибрежной зоне канала, примыкающего к р. Волге

Fig. 2. Scheme of the location of the tank farm in the Saratov region in the coastal zone of the canal adjacent to the Volga river

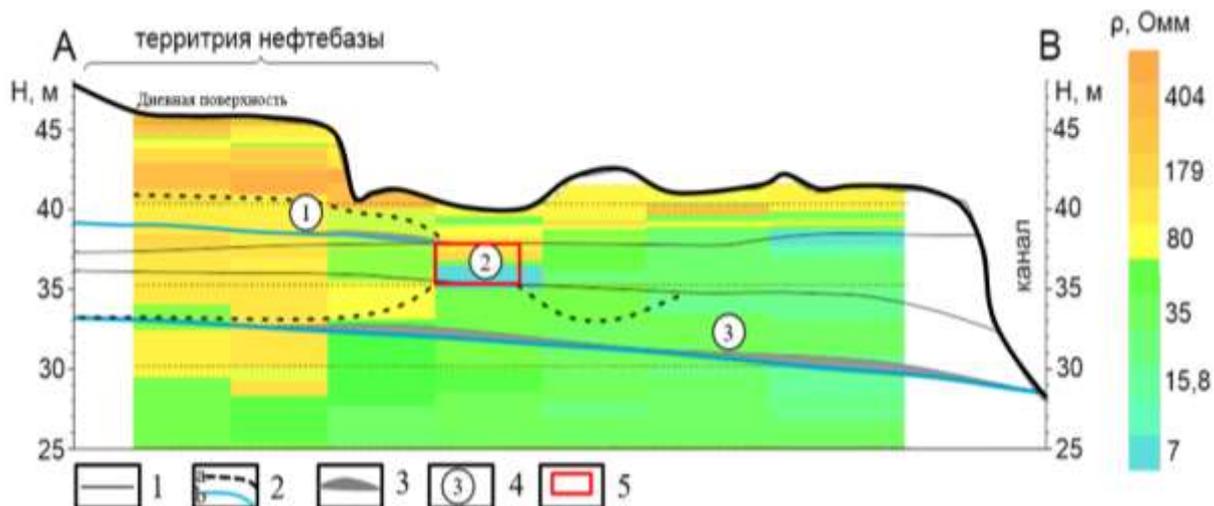


Рис. 3. Геоэлектрический разрез и результаты его геоэкологической интерпретации по линии А–В (вертикальная шкала – абсолютная отметка высоты): 1 – границы слоев; 2 – контур ареалов распространения деградации нефтепродуктов, характеризующихся пониженными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) (а – верхняя кромка, б – нижняя кромка, отвечающая поверхности водоносного горизонта); 3 – линзы гравитационно-подвижных углеводородов; 4 – номер зоны загрязнения (иммобилизованное загрязнение грунтов нефтепродуктами над: 1 – верховодкой, 2 – уровнем грунтовых вод); 5 – гидрогеологическое окно в слое суглинков (зона 2)

Fig. 3. Geoelectric section and the results of its geoeological interpretation along the line A–B: 1 – layer boundaries; 2 – contour of the distribution areas of degradation of petroleum products, characterized by low values of resistivity (a – the upper edge, b – the lower edge corresponding to the surface of the aquifer); 3 – lenses of gravitationally mobile hydrocarbons; 4 – pollution zone number (immobilized soil contamination with oil products above: 1 – perched water, 2 – groundwater level); 5 – hydrogeological window in the loam layer (zone 2)

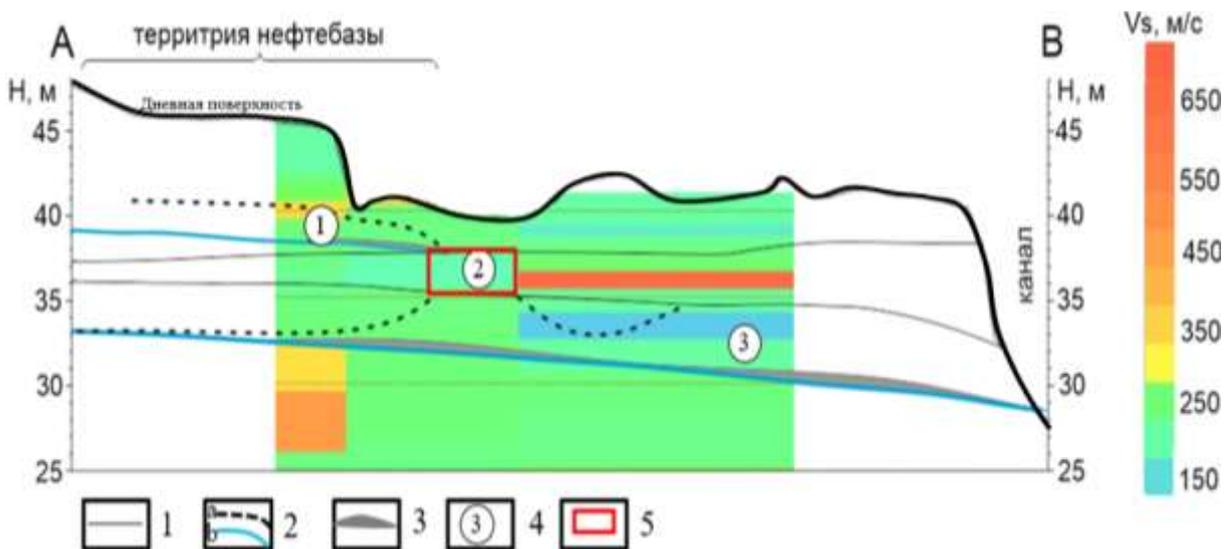


Рис. 4. Скоростной разрез и результаты его геоэкологической интерпретации по линии А–В (вертикальная шкала – абсолютная отметка высоты): 1 – границы слоев; 2 – контур ареалов распространения деградации нефтепродуктов, характеризующийся пониженными значениями УЭС (а – верхняя кромка, б – нижняя кромка, отвечающая поверхности водоносного горизонта); 3 – линзы гравитационно-подвижных углеводородов; 4 – номер зоны загрязнения (иммобилизованное загрязнение грунтов нефтепродуктами над: 1 – верховодкой, 2 – уровнем грунтовых вод); 5 – гидрогеологическое окно в слое суглинков (зона 2)

Fig. 4. Velocity section and results of its geoeological interpretation along the line A–B: 1 – layer boundaries; 2 – contour of the distribution areas of degradation of petroleum products, characterized by low values of resistivity (a – the upper edge, b – the lower edge corresponding to the surface of the aquifer); 3 – lenses of gravitationally mobile hydrocarbons; 4 – pollution zone number (immobilized soil contamination with oil products above: 1 – perched water, 2 – groundwater level); 5 – hydrogeological window in the loam layer (zone 2)

УЭС грунтов рассматриваемого песчано-глинистого разреза определяется его литологией: наибольшими значениями УЭС характеризуются чистые сухие пески;

наименьшими – влажные, глинистые пески и суглинки. Длительное загрязнение нефтепродуктами понижает УЭС грунтов в связи с деятельностью микроорганизмов,

например, [9], поэтому участки загрязнения нефтепродуктами и приуроченная к ним зона биодegradации, как правило, проявляются на геоэлектрических разрезах низкоомными ареалами. В северной части профиля наблюдается понижение УЭС в интервале глубин 5–10 м, что, по-видимому, обусловлено влиянием слоя верховодки и приуроченного к этой поверхности ареала загрязнения.

На сейсмическом разрезе также могут оцениваться отдельные параметры загрязнения. Основным результатом сейсморазведочных работ являлось изучение скоростных неоднородностей (рис. 4).

В ходе обработки сейсмограмм, полученных методом МПВ, по методике «многоканального анализа поверхностных волн (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW)» [10, 11] получены разрезы до глубины 20 м. По полученным разрезам изучались зако-

номерности распространения поперечных волн (V_s) в условиях загрязнения грунтов нефтепродуктами. В соответствии с результатом многочисленных научных исследований установлено, что снижение скорости сейсмических волн является индикатором прочностных характеристик грунтов [12]. При долговременном воздействии на грунты продуктов происходит биодegradация углеводородов с образованием органических кислот, которые разрушают минеральный скелет, вымывая из него некоторые минералы [13]. Поэтому, вероятнее всего, низкоскоростные аномалии могут рассматриваться в качестве индикаторов мест долговременного накопления нефтепродуктов.

Вторая нефтебаза располагается в Ярославской области на берегу реки Волги. Местоположение объекта представлено на рис. 5.

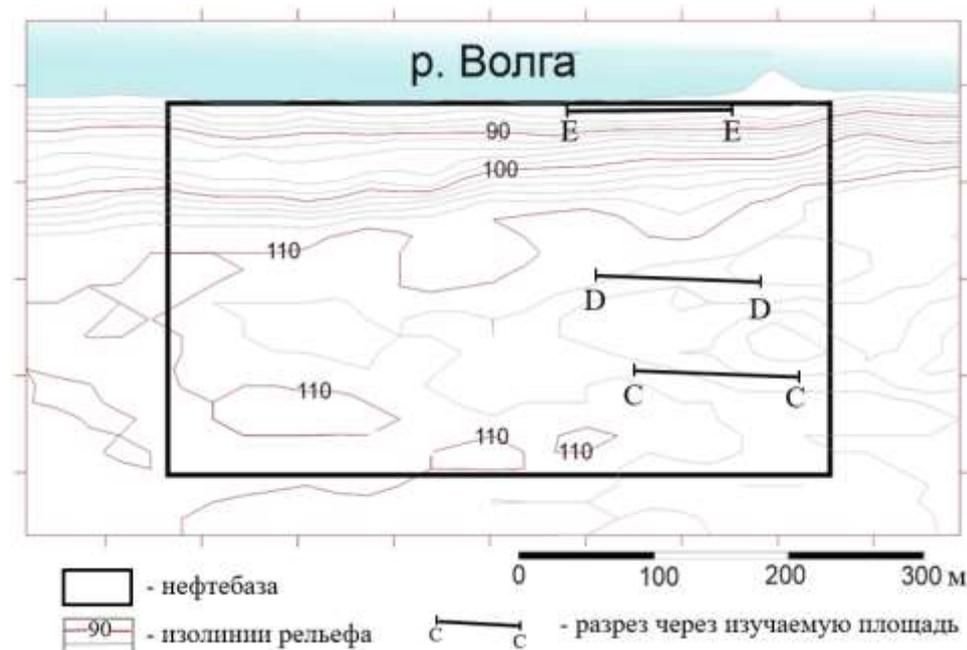


Рис. 5. Схема расположения нефтебазы в Ярославской области на берегу реки Волги

Fig. 5. Scheme of the location of the tank farm in the Yaroslavl region on the bank of the Volga River

Рельеф территории имеет выраженный уклон в сторону реки – на север. Нефтебаза также является нефункционирующим объектом.

Участок работ расположен в пределах речной и озерной террасы верхневалдайского времени. В геологическом разрезе в интервале глубин от дневной поверхности до 20 м принимают участие техногенные отложения, озерно-аллювиальные отложения первой надпойменной террасы, отложения московской морены, нерасчлененный комплекс флювиогляциальных и озерно-ледниковых отложений.

На рис. 6 приведены два варианта геоэлектрических разрезов для нефтебазы Ярославской области. Разрезы отображают положение двух слоев: маломощные (до 3–5 м) высокоомные (более 500 Ом) насыпные грунты; слой, представленный переслаиванием песков, суглинков и супесей мощностью до 20 м. Этот слой относительно однороден по УЭС и его параметры в общем случае не позволяют выделить ареалы загряз-

нения. В этих условиях необходимо выполнить дополнительный расчет статистических характеристик геоэлектрических разрезов с оценкой значений параметра «индикатор нефтенасыщенности» [14]:

$$P_{ВЭЗ} = \frac{УЭС(H_{УГВ} + h)}{УЭС(H_{УГВ} - h)},$$

где $H_{УГВ}$ – глубина уровня грунтовых вод; h – рассматриваемый диапазон глубин относительно УГВ, м.

Этот параметр ($P_{ВЭЗ}$) рассчитывается по отношению УЭС грунтов, расположенных выше уровня грунтовых вод, к УЭС водонасыщенных пород. На разрезе в значениях $P_{ВЭЗ}$ исключается влияние литолого-фациальной изменчивости пород.

Долговременное насыщение грунтов нефтепродуктами снижает удельное электросопротивление пород как в интервале дислокации линзы, так и над ним [12]. Повышение значений параметра $P_{ВЭЗ}$ более 1 маркирует ареалы проявления загрязненных толщ.

На всем протяжении геоэлектрического разреза В–В отмечается низкий коэффициент нефтегазонасыщения, что свидетельствует об отсутствии загрязнения грунтов. На разрезе С–С в интервалах 10–25,

30–45, 65–130 м индекс $R_{ВЭЗ}$ превышает 1. Соответствующие ареалы рассматриваются нами как зоны загрязнения.

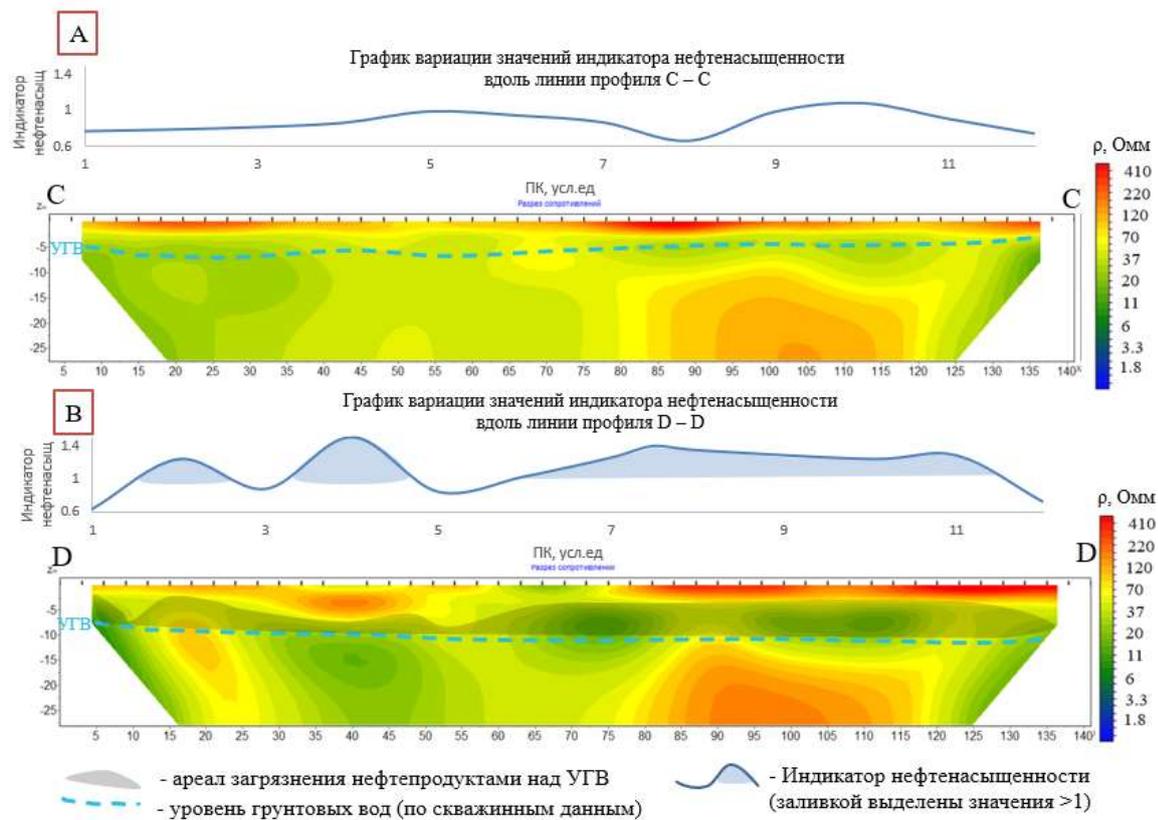


Рис. 6. Электротомографические разрезы: А) с отсутствующим ареалом загрязнения нефтепродуктами; В) при наличии ареала загрязнения нефтепродуктами в зоне аэрации

Fig. 6. Electrotomographic sections: A) with no area of oil pollution; B) if there is an area of oil pollution in the aeration zone

В ходе исследований метод естественного поля (ЕП) применялся для выделения зон наиболее интенсивной фильтрации грунтовых вод в реку. Информативность метода обусловлена тем, что при фильтрации воды через пористые породы возникают электрические «токи течения», вызванные избытком ионов одного знака (как правило, катионов) в перемещающейся жидкой фазе, что вызывает появление положительных аномалий естественного электрического поля, регистрируемых на поверхности земли [15]. Таким образом, метод ЕП может эффективно использоваться для оконтуривания зоны просачивания грунтовых вод в том числе из ареала загрязнения. Области просачивания согласуются с результатами электротомографии, где отмечаются аномалиями пониженного сопротивления (рис. 7).

Обобщенная физико-геологическая модель загрязнения нефтебаз

Выполненный анализ закономерностей распределения ареалов загрязнения для двух нефтебаз в бассейне реки Волги с учетом опубликованных зарубежных и отечественных геофизических исследований аналогичных объектов методами электроразведки и сейсморазведки позволил сформировать обобщенную модель, описывающую

характер распределения загрязнения нефтепродуктами в грунтах нефтебаз бассейна реки Волги.

Опорное сечение построено нами в направлении с севера на юг – от основного источника загрязнения до речного обрыва (рис. 8).

Загрязнения грунтов нефтебазы развиваются на фоне субгоризонтальных горизонтов верхней части разреза. В опорном разрезе последовательно сверху вниз выделяются:

- *Слой № I, представленный песками зоны аэрации, мощностью 5–7 м имеет следующие петрофизические характеристики: $\rho=200\text{--}1000$ Ом·м, $V_p=400$ м/с, $V_s=310$ м/с;*
- *Слой № II, представленный суглинками, является водоупором мощностью 3–5 м и имеет следующие петрофизические характеристики: $\rho=20\text{--}120$ Ом·м, $V_p=500$ м/с, $V_s=400$ м/с. Слой прослеживается не повсеместно на площади исследований: в его сечении выделяются гидрогеологические окна, пронизываемые флюидами, в том числе загрязнениями.*
- *Слой III, представленный песками, выполняет разрез ниже водоупора и прослеживается на глубину до уровня грунтовых вод. Слой III имеет такие же петрофизические характеристики, что и слой № I.*

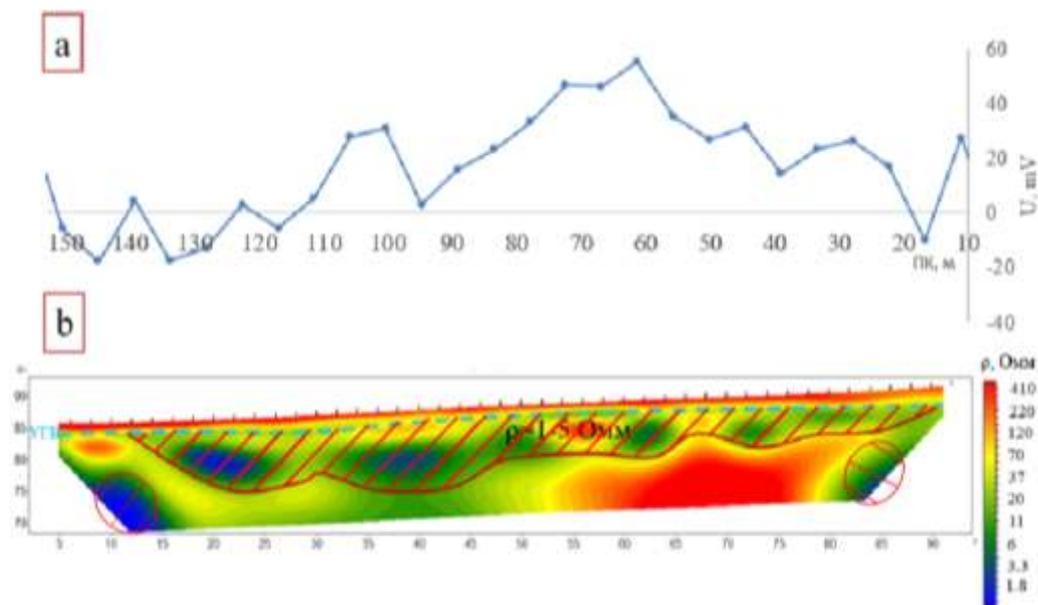


Рис. 7. Наблюдаемые значения естественного электрического поля (а) и электротомографический разрез (б) в сечении профиля В–В (зона фильтрации раствора грунтовых вод с нефтепродуктами выделена красной штриховкой)

Fig. 7. Observed values of the spontaneous polarization (a) and the electrotomographic section (b) in section B–B (filtration area of groundwater solution with LNAPL is highlighted in red)

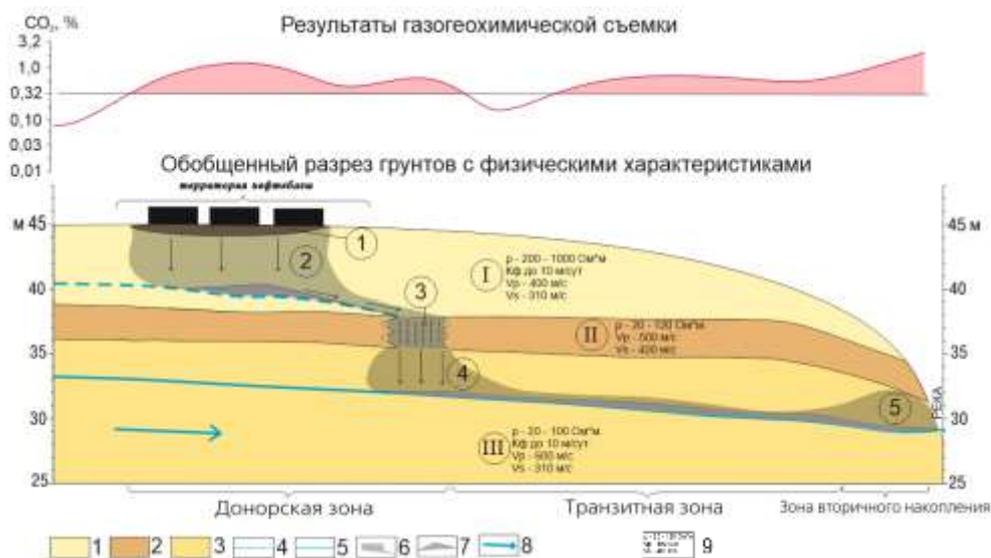


Рис. 8. Физико-геологическая модель распределения загрязнений грунтов реки Волги: Литология 1–3 (1 – насыпные грунты и сухие пески; 2 – суглинки; 3 – пески); 4 – уровень верховодки; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – ареалы распространения иммобилизованных нефтепродуктов; 7 – линзы гравитационно-подвижных нефтепродуктов; 8 – направление движения грунтовых вод; 9 – физические характеристики грунтов (ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; V_p – скорость продольных волн, м/с; V_s – скорость поперечных волн, м/с). Цифрами: I – пески зоны аэрации и их физические свойства, II – суглинки и их физические свойства, III – водонасыщенные пески и их физические свойства; 1 – приповерхностное загрязнение; 2 – загрязнение зоны аэрации и безнапорного водоносного горизонта; 3 – зона просачивания в гидрогеологическом окне; 4 – загрязнения грунтов над водоносным горизонтом; 5 – зона вторичного накопления нефтепродуктов (параметры загрязненных зон представлены в таблице)

Fig. 8. Physical-geological model of the distribution of soil pollution in the Volga River: Lithology 1–3 (1 – bulk soils and dry sands; 2 – loams; 3 – sands); 4 – level of the leader; 5 – groundwater level; 6 – distribution areas of immobilized oil products; 7 – lenses of gravitationally mobile oil products; 8 – groundwater movement direction; 9 – physical characteristics of soils (ρ – electrical resistivity, Ом·м; V_p – longitudinal wave velocity, m/s; V_s – shear-wave velocity, m/s). In numbers: I – sands of the aeration zone and their physical properties, II – loams and their physical properties, III – water-saturated sands and their physical properties; 1 – surface pollution; 2 – pollution of the aeration zone and free-flowing aquifer; 3 – seepage zone in the hydrogeological window; 4 – soil pollution above the aquifer; 5 – zone of secondary accumulation of oil products (parameters of contaminated zones are presented in Table)

В исследуемом разрезе выделяются следующие типы подземных вод:

1. *Верховодка*, расположенная на глубине 3–6 м, вскрытая наблюдательными скважинами, имеет следующие характеристики: $\rho=200\text{--}1000$ Омм, $V_p=400$ м/с, $V_s=310$ м/с.
2. *Грунтовые воды*, расположенные на глубине 7–14 м, проявляются на геоэлектрических и сейсмических разрезах следующими средними значениями: $\rho=200\text{--}100$ Омм, $V_p=600$ м/с, $V_s=310$ м/с.

Модель распространения легких нефтепродуктов в прибрежной зоне водоемов подразделяется на три зоны по латерали: донорскую, транзитную и зону вторичного накопления [16]. В указанных зонах происходят процессы распространения и аккумуляции нефтепродуктов, что отражается на физических свойствах грунтов благодаря активным химическим и биологическим реакциям, что, как следствие, влияет на результаты геофизических исследований. В соответствии с авторской физико-геологической моделью прибрежной зоны реки Волги загрязнения нефтепродуктами приурочены к имеющимся в геологической среде водоносным слоям.

Донорская зона представлена следующими ареалами:

1. Верхний ареал, подстилающий нефтеналивные резервуары, представляет собой приповерхностное загрязнение почв, мощностью 1–2 м. Этот слой имеет физические характеристики: $\rho=60\text{--}200$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с, что отличает его от вмещающей среды.
2. Ареал загрязнения над безнапорным водоносным горизонтом мощностью 4–5 м имеет физические характеристики: $\rho=60\text{--}200$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с.

Таблица. Физические характеристики ареалов загрязнений по данным геофизических исследований

Table. Physical characteristics of pollution areas according to geophysical survey data

№ ареала Area number	ρ , Омм/Ohm-m	V_p , м/с/m/s	V_s , м/с/m/s
1	60–200	350	210
2	60–110	350	210
3	10–50	450	300
4	20–80	350	210
5	5–20	350	210

- Транзитная зона представлена такими ареалами, как:
3. Ареал просачивания в гидрогеологическом окне водоупорного слоя предположительно имеет размер по вертикали до 3 м и физические характеристики: $\rho=10\text{--}50$ Омм, $V_p=450$ м/с, $V_s=300$ м/с.
 4. Ареал загрязнения нижнего водоносного горизонта, локализованный выше уровня грунтовых вод,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Light nonaqueous phase liquids / C.J. Newell, S.D. Acree, R.R. Ross, S.S. Huling. – USA: U.S. Environmental Protection Agency, Ground Water Issue, 1995. – 28 p.

мощностью 1–3 м имеет физические характеристики: $\rho=20\text{--}80$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с.

5. Отдельно выделяется зона вторичного накопления мощностью 1–2 м, имеет физические характеристики: $\rho=5\text{--}20$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с.

В систематизированном виде петрофизические характеристики ареалов загрязнения представлены в таблице.

Заключение

Таким образом, выполненные исследования характера загрязнения грунтов двух нефтебаз в районе реки Волги с привлечением материалов, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе [17–19], позволили обосновать параметры обобщенной физико-геологической модели загрязнения грунтов нефтебаз. В общем случае распределение ареалов загрязнения подчиняется особенностям геологического строения и гидрогеологического режима рассматриваемых площадей и включает пять зон:

1. Верхний ареал, подстилающий нефтеналивные резервуары, представляет собой приповерхностное загрязнение почв мощностью 1–2 м. Этот слой имеет физические характеристики: $\rho=60\text{--}200$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с, что отличает его от вмещающей среды.
 2. Ареал загрязнения над безнапорным водоносным горизонтом мощностью 4–5 м имеет физические характеристики: $\rho=60\text{--}200$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с.
- Транзитная зона представлена:
3. Ареал просачивания в гидрогеологическом окне водоупорного слоя предположительно имеет размер по вертикали до 3 м и физические характеристики: $\rho=10\text{--}50$ Омм, $V_p=450$ м/с, $V_s=300$ м/с.
 4. Ареал загрязнения нижнего водоносного горизонта, локализованный выше уровня грунтовых вод, мощностью 1–3 м имеет физические характеристики: $\rho=20\text{--}80$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с.
 5. Отдельно выделяется зона вторичного накопления мощностью 1–2 м, имеет физические характеристики: $\rho=5\text{--}20$ Омм, $V_p=350$ м/с, $V_s=210$ м/с.

Эта модель может использоваться для прогнозирования характера загрязнения резервуарных парков, сливно-наливных пунктов, ремонтных мастерских автомашин, моечных площадок и автозаправочных станций, расположенных вблизи речных и озерных бассейнов.

Стоит отметить, что комплексная интерпретация материалов снижает неоднозначность решения обратной задачи [20–22]. Для лучшего построения геологических моделей по геофизическим данным разрабатываются новые методические решения по комплексированию геофизических методов в полевых условиях [23], также создаются новые алгоритмы совместной интерпретации данных нескольких методов [24, 25].

2. An assessment of the effects of crude oil pollution on soil properties / M. Marinescu, M. Toti, V. Tanase, V. Carabulea, G. Ploeanu, I. Calciu // Ann. Food Sci. Technol. – 2010. – № 11. – P. 94–99.

3. Hydrogeophysical imaging of deposit heterogeneity and groundwater chemistry changes during DNAPL source zone bioremediation / J.E. Chambers, P.B. Wilkinson, G.P. Wealthall, M.H. Loke, R. Dearden, R. Wilson, D. Allen, R.D. Ogilvy // J. Contam. Hydrol. – 2010. – V. 118 (1–2). – P. 43–61.
4. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging / A. Flores Orozco, P. Ciampi, K. Timea, M. Censini, M. Papini, G.P. Deidda, G. Cassiani // Science of The Total Environment. – 2021. – V. 768. – P. 144997.
5. Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. A review on the use of geoelectrical methods for characterization and monitoring of contaminant plumes // Acta Geophys. – 2022. – № 70. – P. 2099–2117.
6. GPR-4D monitoring a controlled LNAPL spill in a masonry tank at USP, Brazil / L. Bertolla, J.L. Porsani, F. Soldovieri, I. Catapano // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – V. 103. – P. 237–244.
7. Шкабарня Н. Г., Шкабарня Г. Н. Картирование нефтяных загрязнений геологической среды с помощью геофизических методов // Вологодские чтения. – 2008. – № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kartirovanie-neftyanyh-zagryazneniy-geologicheskoy-sredy-s-pomoschyu-geofizicheskikh-metodov> (дата обращения: 16.01.2023).
8. 3D electrical resistivity tomography to locate DNAPL contamination around a housing estate / V. Naudet, J.C. Gourry, F. Girard, F. Mathieu, A. Saada // Near Surface Geophysics. – 2014. – № 12 (3). – P. 351–360.
9. Self-potential monitoring of a crude oil-contaminated site (Trecate, Italy) / V. Giampaolo, E. Rizzo, K. Titov, P. Konosavsky, D. Laletina, A. Mainault, V. Lapenna. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 5842 p.
10. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. – 1999. – V. 64. – P. 800–808.
11. Sauck W.A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – № 44. – P. 151–165.
12. Rajabi H., Sharifipour M. Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – 78. – P. 3685–3717.
13. Field evidence for geophysical detection of subsurface zones of enhanced microbial activity / E.A. Atekwana, E. Atekwana, F.D. Legall, R.V. Krishnamurthy // Geophysical Research Letters. – 2004. – V. 31. – № 23. – P. 1–5.
14. Галин Д.Л. Интерпретация данных инженерной геофизики. – М.: Недра, 1989. – 114 с.
15. Шакуро С.В., Боровский М.Я. Эффективность геофизических методов при обследовании шламонакопителей предприятий нефтеперерабатывающей промышленности // Управление техносферой: электрон. журнал. – 2021. – Т. 4. Вып. 1. – С. 75–87. URL: <https://technosphere-ing.ru> (дата обращения: 16.01.2023).
16. Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2011. – 248 с.
17. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243. – С. 388–392.
18. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга / М.А. Пашкевич, Д. Бек, В.А. Матвеева, А.В. Алексеенко // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 125–130.
19. Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р. Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 937–946.
20. Алексеев И.В., Дашко Р.Э. К вопросу о роли биокоррозионных процессов в подземной среде мегаполисов // Инженерная геология. – 2016. – № 1. – С. 22–29.
21. Результаты комплексных геофизических исследований по поиску склепов на территории загородного некрополя Херсонеса Таврического в Карантинной балке / В.В. Глазунов, А.С. Агеев, Г.Д. Горелик, Т.В. Сарапулкина // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 1–9.
22. 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.
23. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings / S. Daniliev, N. Danileva, S. Mulev, V. Frid // Minerals. – 2022. – № 12. – P. 609–630.
24. Sysoev A.P., Gorelik G.D. Parametric method of compensation for near-surface heterogeneity in processing CDP data // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – V. 5. – P. 763–768.
25. 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. – С. 217–233.

Поступила: 17.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 04.04.2023 г.

Информация об авторах

Мингалева Т.А., аспирант Санкт-Петербургского горного университета.

Шакуро С.В., генеральный директор ООО «ФРОНТ геология».

Егоров А.С., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 550.837.3; 550.8.014; 504.064.3

FEATURES OF THE STRUCTURE AND NATURE OF POLLUTION OF THE UPPER PART OF THE SECTION OF OIL STORAGE FACILITIES IN THE VOLGA RIVER VALLEY

Tatiana A. Mingaleva¹,
tatiana.mingaleva@bk.ru

Sergey V. Shakuro²,
s.shakuro@gmail.com

Alexey S. Egorov¹,
egorov_as@pers.spmi.ru

¹ Saint-Petersburg Mining University,
2, Vasilyevsky Island, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia.

² LLC «FRONT Geology»,
13, Geroy Chugunov street, Nizhny Novgorod, 603032, Russia.

The relevance of the study is caused by the fact that soil pollution with oil products has a complex dynamic character in the spatio-temporal region. Therefore, the physical properties of soils in solving geophysical problems of contouring and determining the thickness of pollution can change under the influence of various factors, expanding the range of search signs of pollution. Determination of physical parameters for areas of oil pollution, similar in nature of development and geological conditions, can help in the future for the effective parameterization of hydrocarbons in soils.

The main aim is to build a generalized model with physical properties (electrical resistivity, compressional and shear-wave velocities) for the soils of long-term oil depot territories.

Methods: analysis of literary sources on the research topic; processing and interpretation of field geophysical material for tank farms located on the banks of the Volga River; building a generalized model with a description of the physical characteristics of soils based on the results of geophysics for the soils of tank farms.

Results. The authors have studied the nature of soil pollution of two oil depots in the Volga River region using materials published in domestic and foreign literature, which made it possible to substantiate the parameters of a generalized physical-geological model of soil pollution of oil depots. In the general case, the distribution of pollution areas is subject to the features of the geological structure and hydrogeological regime of the areas under consideration and generally includes five zones (the upper area, the area of pollution above the free-flow horizon, the area of seepage in the hydrogeological window, the area of groundwater pollution, the zone of secondary accumulation). This model can be used to predict the nature of pollution in tank farms, loading and unloading points, car repair shops, washing sites and gas stations located near river and lake basins. The model of distribution of oil products in soils will be complex, which will also be expressed in geophysical sections.

Key words:

Light non-aqueous phase liquids, oil pollution modeling, electrical exploration, seismic exploration, tank farms.

REFERENCES

1. Newell C.J., Acree S.D., Ross R.R., Huling S.S. *Light nonaqueous phase liquids*. USA, U.S. Environmental Protection Agency, Ground Water Issue, 1995. 28 p.
2. Marinescu M., Toti M., Tanase V., Carabulea V., Plopeanu G., Calciu I. An assessment of the effects of crude oil pollution on soil properties. *Ann. Food Sci. Technol.*, 2010, no. 11, pp. 94–99.
3. Chambers J.E., Wilkinson P.B., Wealthall G.P., Loke M.H., Dearden R., Wilson R., Allen D., Ogilvy R.D. Hydrogeophysical imaging of deposit heterogeneity and groundwater chemistry changes during DNAPL source zone bioremediation. *J. Contam. Hydrol.*, 2010, 118 (1–2), pp. 43–61.
4. Flores Orozco A., Ciampi P., Timea K., Censini M., Papini M., Deidda G.P., Cassiani G. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 768, pp. 144997.
5. Sanuade O.A., Arowoogun K.I., Amosun J.O. A review on the use of geoelectrical methods for characterization and monitoring of contaminant plumes. *Acta Geophys.*, 2022, no. 70, pp. 2099–2117.
6. Bertolla L., Porsani J.L., Soldovieri F., Catapano I. GPR-4D monitoring a controlled LNAPL spill in a masonry tank at USP, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 103, pp. 237–244.
7. Shkabarnya N.G., Shkabarnya G.N. Kartirovanie neftyanykh zagryazneniy geologicheskoy srede s pomoshchyu geofizicheskikh metodov [Mapping of oil pollution of the geological environment using geophysical methods]. *Vologda Readings*, 2008, no. S. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kartirovanie-neftyanykh-zagryazneniy-geologicheskoy-srede-s-pomoschyu-geofizicheskikh-metodov> (accessed 16 January 2023).
8. Naudet V., Gourry J.C., Girard F., Mathieu F., Saada A. 3D electrical resistivity tomography to locate DNAPL contamination around a housing estate. *Near Surface Geophysics*, 2014, no. 12 (3), pp. 351–360.
9. Giampaolo V., Rizzo E., Titov K., Konosavsky P., Laletina D., Maïneult A., Lapenna V. *Self-potential monitoring of a crude oil-contaminated site (Trecate, Italy)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2013. 5842 p.
10. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 3, pp. 800–808.
11. Sauck W.A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, no. 44, pp. 151–165.
12. Rajabi H., Sharifipour M. Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 5, pp. 3685–3717.
13. Atekwana E.A., Atekwana E., Legall F.D., Krishnamurthy R.V. Field evidence for geophysical detection of subsurface zones of enhanced microbial activity. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, no. 23, pp. 1–5.
14. Galin D.L. *Interpretatsiya dannykh inzhenernoy geofiziki* [Interpretation of engineering geophysics data]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 114 p.

15. Shakuro S.V., Borovsky M.Ya. Effektivnost geofizicheskikh metodov pri obsledovanii shlamonakopiteley predpriyatiy neftepererabatyvayushchey promyshlennosti [Efficiency of geophysical methods in the survey of sludge reservoirs of oil refining industry enterprises]. *Management of the technosphere*, 2021, vol. 4, pp. 75–87. Available at: <https://technosphere-ing.ru> (accessed 16 January 2023).
16. Maksimovich N.G., Khairulina E.A. *Geokhimicheskie barery i okhrana okruzhayushchey sredy* [Geochemical barriers and environmental protection]. Perm, Perm State University Publ., 2011. 248 p.
17. Sarapulova G.I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 243, pp. 388–392. In Rus.
18. Pashkevich M.A., Bech J., Matveeva V.A., Alekseenko A.V. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg, *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 125–130. In Rus.
19. Shulaev N.S., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R. Regularities of electrochemical cleaning of oil-contaminated soils. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 252, pp. 937–946.
20. Alekseev I. V., Dashko R. E. On the role of biocorrosion processes in the underground environment of megacities. *Engineering Geology*, 2016, no. 1, pp. 22–29. In Rus.
21. Glazunov V.V., Ageev A.S., Gorelik G.D., Sarapulkina T.V. Results of comprehensive geophysical studies on the search for Crypts on the territory of suburban necropolis of Tauric Chersonese in the Karantinnaya Balka. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 1–9.
22. Grigorev G.S., Salishchev M.V., Senchina N.P. On the applicability of electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing, *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 492–500.
23. Daniliev S., Danileva 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, no. 12, pp. 609–630.
24. Sysoev A.P., Gorelik G.D. Parametric method of compensation for near-surface heterogeneity in processing CDP data. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 5, no. 6, pp. 763–768.
25. Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I., Yakovleva A.A. Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by method of unmanned aeromagnetic survey by the example of the Neryungriskiy district of Yakutia, *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 254, pp. 217–233.

Received: 17 January 2023.

Reviewed: 4 April 2023.

Information about the authors

Tatiana A. Mingaleva, graduate student, Saint-Petersburg Mining University.

Sergey V. Shakuro, general manager, LLC «FRONT Geology».

Alexey S. Egorov, Dr. Sc., professor, Saint-Petersburg Mining University.