

УДК 553.98; 624.131

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2017

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО РАЗРЕЗУ НА ТЕРРИТОРИЯХ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

П.А. Красильников, В.В. Середин

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

STUDY OF REGULARITIES AND CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF HYDROCARBON DISTRIBUTION IN A SECTION ON TERRITORIES OF OIL TREATMENT ENTERPRISES

Pavel A. Krasilnikov, Valerii V. Seredin

Perm State National Research University (15 Bukireva st., Perm, 614068, Russian Federation)

Получена / Received: 17.03.2017. Принята / Accepted: 19.04.2017. Опубликовано / Published: 30.06.2017

Ключевые слова:

нефтезагрязненные территории, углеводороды, глубина проникновения, моделирование, математические модели, грунт, математическая статистика, геостатистика, техногенное загрязнение, геология, геоэкология.

В настоящее время активная хозяйственная деятельность человека приводит к значительному техногенному загрязнению. В ряде случаев в результате аварийных происшествий происходит загрязнение геологической среды углеводородами, что приводит к изменению физико-механических свойств грунтов и отрицательной сказывается на экосистеме в целом. Данная работа посвящена выявлению закономерностей и построению математических моделей распределения углеводородов по разрезу на территориях нефтеперерабатывающих предприятий, позволяющих прогнозировать глубину загрязнения в случае аварийных разливов углеводородов. Полученная информация позволит оценить изменения и спрогнозировать несущую способность грунтов при аварийных разливах нефтепродуктов. Изучение особенностей распределения углеводородов в грунтовом массиве основывается на выявлении природно-техногенных закономерностей, которые описываются с помощью математического аппарата. Тем самым дается методологический подход к изучению этих закономерностей в зависимости от геологических условий территорий, подверженных риску аварийного разлива нефтепродуктов.

Выявлены три модели распределения углеводородов по разрезу, которые контролируются геологическими условиями (литологией и глубиной залегания водоносного горизонта). На основании выявленных закономерностей разработаны математические модели, позволяющие по геологическим показателям (мощности суглинка и щебенитого грунта, а также по глубине залегания песчаников) прогнозировать степень загрязнения грунтов углеводородами. В результате статистической обработки установлено влияние геологического строения на глубины проникновения и содержание углеводородов.

Было подтверждено, что на распределения углеводородов существенное влияние оказывает тип пород и прежде всего их сорбционная способность к углеводородам, фильтрационные свойства (пористость и проницаемость) и водонасыщенность. В случае, если приповерхностная зона земли сложена песками, которые имеют низкую сорбционную способность к углеводородам, высокую открытую пористость и высокие фильтрационные свойства, зона загрязнения углеводородами будет минимальна по сравнению с тем, если бы она была сложена из глин или суглинков.

Key words:

oil contaminated territories, hydrocarbons, penetration depth, modeling, mathematical models, ground, mathematical statistics, geostatistics, artificial pollution, geology, geoecology.

Nowadays, active human economic activity leads to significant man-made pollution. In a number of cases geological environment is polluted with hydrocarbons by an accident. That leads to change in physical and mechanical properties of grounds and has negative impact on entire an ecosystem. This work is devoted to identification of regularities and construction of mathematical models for distribution of hydrocarbons along a section on territories of oil refineries, which allow predicting the level of pollution in case of accidental hydrocarbon spills. Obtained information allows estimating changes and predicting bearing capacity of grounds during accidental oil spills. Study of hydrocarbon distribution in ground massif is based on identification of natural and artificial regularities, which are described by math body. This gives a methodological approach to study these regularities depending on geological conditions of territories that are subject to risk of accidental oil spills.

Three models of distribution of hydrocarbons along a section are revealed. They are controlled by geological conditions (lithology and depth of occurrence of an aquifer). Based on revealed regularities, mathematical models are developed. They allow to predict degree of ground contamination with hydrocarbons in terms of geological indexes (thickness of loam and crushed rock and depth of occurrence of sandstones). As a result of statistical processing, influence of geological structure on depths of hydrocarbon penetration and content of hydrocarbons is established.

It is confirmed that distribution of hydrocarbons is significantly influenced by type of rocks and their sorption ability for hydrocarbons, penetration properties (porosity and permeability) and water saturation. In case near-surface zone of the earth is composed of sands that have low sorption ability for hydrocarbons, high open porosity and high penetration properties, a hydrocarbon contamination zone will be small in comparison with zone composed of clays or loam.

Красильников Павел Анатольевич – кандидат геологических наук, доцент кафедры инженерной геологии и охраны недр (тел.: +007 342 239 64 39, e-mail: Kafedra.ingeo@gmail.com). Контактное лицо для переписки.

Середин Валерий Викторович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр (тел.: +007 342 239 64 39, e-mail: Kafedra.ingeo@gmail.com).

Pavel A. Krasilnikov (Authors ID in Scopus: 56667332500) – PhD in Geological Sciences, Associate Professor at the Department of Engineering Geology and Protection of Mineral Deposits (tel.: +007 342 239 64 39, e-mail: Kafedra.ingeo@gmail.com). The contact person for correspondence.

Valerii V. Seredin (Authors ID in Scopus: 56974744000) – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Geology and Protection of Mineral Deposits (tel.: +007 342 239 64 39, e-mail: Kafedra.ingeo@gmail.com).

Введение

В настоящее время активная хозяйственная деятельность человека приводит к значительному техногенному загрязнению. В ряде случаев в результате аварийных происшествий происходит загрязнение геологической среды углеводородами, что приводит к изменению физико-механических свойств грунтов и отрицательно сказывается на экосистеме в целом [1–3].

Исследования, проведенные И. Мазуром [4], показывают, что потери нефти в результате аварийных проливов составляют около 3 % от ее годовой добычи. Из вышесказанного становится ясно, что знание глубины проникновения и закономерностей распределения пролитых углеводородов в грунтах важно и актуально.

Анализ работ зарубежных авторов показал, что достаточно много публикаций посвящено проникновению углеводородов в почвы.

За последние 50 лет количество публикаций на тему загрязнения углеводородами почв составило более 10 000 (по данным реферативной базы данных Scopus), причем с каждым годом количество статей увеличивается, а в 2014 г. этому вопросу было посвящено 987 статей в журналах из базы Scopus.

Детализируя запрос в рамках интересующей проблемы (распределение углеводородов в грунтах при аварийных разливах нефтепродуктов), реферативная база данных Scopus находит около 150 работ, причем с каждым годом интерес к этой проблеме не угасает. В 2012 г. этому было посвящено 12, а в 2016 – 16 работ. Статистика показывает, что проблема распространения углеводородов в грунтах в настоящее время очень актуальна.

Больше всего работ, посвященных предмету исследования, опубликовано в США, на втором месте – Китай, затем Канада, Нигерия, Великобритания (рис. 1, а). РФ занимает в этом списке 23-е место. Это связано прежде всего с тем, что российские ученые достаточно мало публикуются в журналах из списка Scopus, а не с отсутствием наработок по этому вопросу.

Большая часть работ (> 80 %) опубликована в журналах по наукам о земле и окружающей природной среде (рис. 1, б).

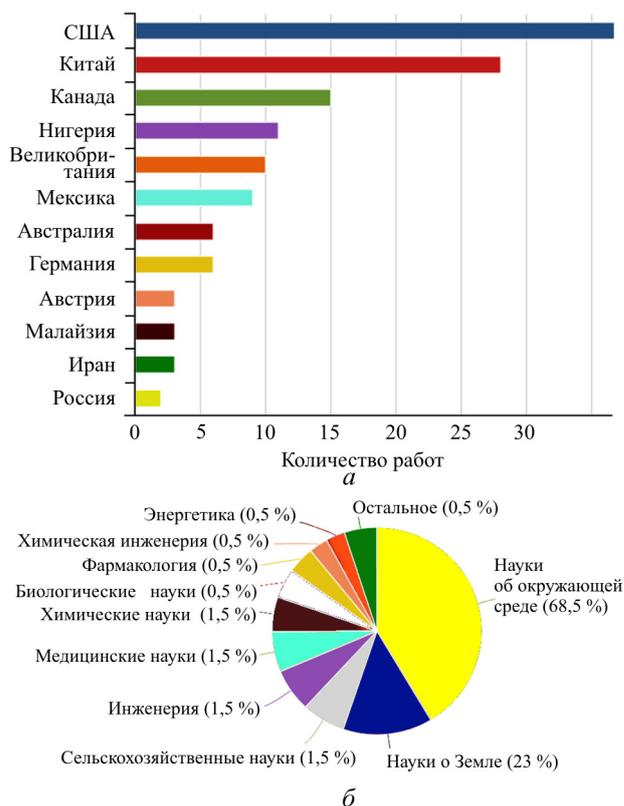


Рис. 1. Публикационная активность стран по предмету исследования (а); отраслевая принадлежность опубликованных работ (б)

Вопросы углеводородного загрязнения окружающей среды изучали различные исследователи, а в 1979 г. существовала целая программа CONCAWE, посвященная защите грунтовых вод от загрязнения нефтепродуктами. Вопросами изучения скорости фильтрации углеводородом занимались и занимаются: M.F. Fingas, S. Grimaz, S. Allen, J. Stewart, G. Dolcetti, S. Halmemies, S. Gröndhal, K. Nenonen, T. Tuhkanen, J.M. Keller, C.S. Simmons, V. Malk, S. Simpanen, Q. Zhang, G. Wang, N. Sugiura, A. Akbari, M. Ardestani, J. Shayegan, B. Zogala, R. Dubiel, W.M. Zuberek, M. Rusin-Zogala, M. Steininger, R. Iturbe, C. Flores, A. Castro, L.G. Torres и др. [5–15].

S. Halmemies, S. Gröndhal, K. Nenonen, T. Tuhkanen исследовали время проникновения масла в различные грунты в лабораторных условиях [9].

Наиболее полно состояние изученности вопроса по исследованию глубины проникновения углеводородов в грунты отражено в совместной работе английских и итальянских ученых S. Grimaz, S. Allen, J.R. Stewart, G. Dolcetti «Экспресс-оценка скорости проникновения углеводородов в почвы сразу же после аварийного

разлива для целей быстрого реагирования». В ней приводится экспресс-метод для прогнозирования скорости проникновения углеводородов в почву после аварийного разлива на землю. Предложенная ими модель применима при соблюдении следующих условий:

а) испарение происходит только с поверхности бассейна до тех пор, пока масло не проникло в грунт;

б) вязкость масла и плотность остаются постоянными в течение времени;

в) адвективные процессы являются доминирующими в инфильтрации;

г) закон Дарси приемлем для определения скорости проникновения в почву [9].

Экспериментальные исследования распределения углеводородов в грунтах в лабораторных условиях опубликованы в работах [1, 16–20]. В них рассчитаны модели, позволяющие прогнозировать скорость фильтрации углеводородов во времени:

– для песка средней крупности

$$V_{п.с.с} = 24,0391 - 0,7733t,$$

где $V_{п.с.с}$ – скорость фильтрации масла в песках сухой средней крупности, мм/сут; t – время фильтрации, сут;

– для песка мелкого

$$V_{п.м.с} = 16,5558 - 0,5321t,$$

где $V_{п.м.с}$ – скорость фильтрации масла в песках мелких, мм/сут; t – время фильтрации, сут;

– для глины

$$V_{г.с} = 8,101 - 0,2309t,$$

где $V_{г.с}$ – скорость фильтрации масла в глинах, мм/сут; t – время фильтрации, сут.

В связи с тем что лабораторные исследования проводились с грунтом в воздушно-сухом состоянии одного фракционного состава, то эти эксперименты не отражают реальных природных условий и являются первым шагом в понимании закономерностей распределения углеводородов по разрезу. Поэтому возникла задача исследования закономерностей распределения углеводородов в полевых условиях. В этой статье приводятся результаты геостатистической обработки данных проведенных полевых работ.

Целью исследования является выявление закономерностей и построение математических моделей распределения углеводородов по

разрезу на территориях нефтеперерабатывающих предприятий, позволяющих прогнозировать глубину загрязнения в случае аварийных разливов.

Полученная информация позволит оценить изменения несущей способности грунтов при углеводородном загрязнении [2, 19, 21, 22].

Изучение особенностей распределения углеводородов в грунтовом массиве основывается на выявлении природно-техногенных закономерностей, которые описываются с помощью математического аппарата [16, 23–25]. Тем самым дается методологический подход к изучению этих закономерностей в зависимости от геологических условий территорий, подверженных риску аварийного разлива нефтепродуктов.

Исходные данные для выявления закономерностей и построения математических моделей

Для выявления закономерностей и построения математических моделей использовались полевые и экспериментальные данные, полученные при выполнении работ по очистке загрязненной нефтепродуктами территории нефтеперерабатывающего предприятия [16, 17, 20].

Для определения содержания углеводородов в грунтах были проведены полевые исследования, включающие в себя бурение скважин, отбор монолитов, изучение кернового материала, гидрогеологических, геоморфологических и других условий.

Для целей оптимизации разведочной сети использовались данные об изменчивости наименее выдержанных геолого-разведочных параметров (углеводородов) исследуемой территории. Параметры размещения скважин определялись из следующих соображений.

На первом этапе опробование производилось равномерно по площади с учетом источников возможного загрязнения (цех этилбензола – корпус 401; емкости с готовой продукцией – корпуса 404 и 405), а также по данным опроса работников о проливах органических соединений в грунт. На втором этапе производилось уплотнение сети скважин. Максимальное их количество было пробурено на площадке цеха 31-го химзавода (рис. 2).

Всего на территории исследований было пробурено 250 скважин, которыми вскрыты антропогенные и четвертичные отложения,

а также породы шешминского горизонта, из которых отобрано более 1160 проб для определения содержания углеводородов.



Рис. 2. Схема расположения скважин

Количественное содержание нефтепродуктов в грунтах проводилось хроматографическим способом на хроматографе «Хром» с пламенно-ионизационным детектором по общепринятой методике.

Краткий физико-географический очерк

Рельеф участка характеризуется наличием выровненных поверхностей и склонов, образовавшихся в результате плоскостного смыва, глубинной и боковой эрозией р. Камы, ее притоков и временных водотоков.

В геоморфологическом отношении в пределах участка выделяются: склон IV левобережной надпойменной террасы р. Камы (правый борт долины р. Пыж); III надпойменная терраса р. Камы, осложненная долиной р. Пыж.

По доминирующим склоноформирующим процессам большая часть склона IV надпойменной террасы относится к делювиальному, а юго-западная, обращенная к долине р. Пыж и являющаяся ее правобережным бортом, представляет эрозионный склон.

Особенности геологического строения исследуемой территории

Антропогенные отложения представлены в основном песками и щебенистым материалом. Мощность этих отложений изменяется от 0 до

1,3 м. Породы четвертичного возраста представлены суглинками, песками и дресвяно-щебенистым грунтом (рис. 3).

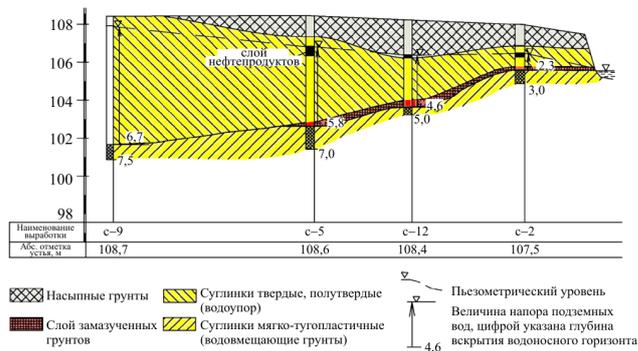


Рис. 3. Геологический разрез по скважинам

Суглинки темно-бурого цвета, от твердой до полутвердой консистенции, плотные, с включениями щебня аргиллита. Мощность суглинка изменяется от 0,8 до 3,7 м. Наибольшая мощность вскрыта скважинами 16–18, а наименьшая – скважинами 7, 8, 15.

Пески серого цвета, влажные, мелко- и среднезернистые, средней плотности. Пески имеют локальное распространение (скважины 7, 15, 17, 19). Максимальная вскрытая мощность достигает 1,7 м.

Дресвяно-щебенистый грунт представлен обломками аргиллита с суглинистым заполнителем до 20%. Он также имеет локальное распространение, максимальная мощность вскрыта скважиной 2 и составляет 1,3 м.

Породы шешминского возраста представлены песчаниками и алевролитами. Песчаники серого цвета, тонкозернистые, плотные, трещиноватые, на глинисто-известковом цементе. Мощность песчаников изменяется от 0,5 до 3,8 м.

Алевролиты темно-вишневого цвета, средней крепости, трещиноватые, их мощность изменяется также в широких пределах – от 0 до 3,8 м.

Методика исследований

Изучение особенностей распределения загрязняющих веществ по разрезу проводилось в следующей последовательности:

- изучалось геологическое строение территории;
- анализировалось количественное содержание нефтепродуктов в почвогрунтах, полученное в результате полевых исследований;

– использовались геологические, вероятностно-статистические и геостатистические методы для установления закономерностей распределения углеводородов в грунтовом массиве.

Результаты исследования

Статистические характеристики результатов количественного содержания нефтепродуктов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные статистические характеристики изучаемых веществ, мг/100 г почвы

Показатель	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимальное отклонение	Максимальное отклонение	Кол-во проб
Бензол	1,01	0,70	0,01	3,67	59
Толуол	0,18	0,43	0,01	1,99	57
Этилбензол	0,74	0,97	0,01	3,23	27
М-параксилол	0,25	0,42	0,004	3,14	71
Ортоксилол	0,15	0,12	0,005	0,84	70
Стирол	0,45	1,22	0,006	6,00	43
Изомасляный альдегид	10,21	11,16	0,40	44,80	16
Изобутиловый спирт	20,65	17,11	2,50	51,21	16
Бутиловый спирт	15,56	24,60	1,60	92,80	30
2-этилгексанол	39,77	74,37	2,00	172,57	5
2-этилгексаналь	34,56	72,19	1,90	244,00	11
Глубина отбора проб, м	2,32	1,99	0,1	9,0	–

Ароматические углеводороды – бесцветные жидкости со специфическим запахом, легче воды и в ней не растворяются, однако легко растворяются в органических растворителях – спирте, эфире, ацетоне. Физические свойства некоторых аренов представлены в табл. 2.

Анализ распределения углеводородов по разрезу показывает, что в исследуемой толще бензол не имеет закономерного распределения. Метипараксилолы обнаружены в значительном количестве образцов, при этом наблюдается неявно выраженная тенденция: с увеличением глубины их содержание уменьшается. Размах выборки по этому показателю ниже, чем у бензола. Ортоксиллол также содержится во многих пробах, его распределение по разрезу подчиняется той же закономерности, что и у метипараксилолов. Стирол, этилбензол и толуол обнаружены в небольших количествах образцов, поэтому явно выраженную закономерность их распределения по разрезу установить достаточно сложно. На рис. 4 представлена трехмерная модель распределения углеводородов в грунтовом массиве, созданная в программе Voxler.

Таблица 2

Физические свойства некоторых аренов

Название	Формула	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Плотность при 20 °С	Динамическая вязкость при 20 °С, Па·с
Бензол	C_6H_6	+5,5	80,1	0,8790	0,652
Толуол (метилбензол)	$C_6H_5CH_3$	-95,0	110,6	0,8669	0,584
Этилбензол	$C_6H_5C_2H_5$	-95,0	136,2	0,8670	0,596
орто-мета-пара-		-25,18	144,41	0,8802	0,707
		-47,87	139,10	0,8642	0,548
		13,26	138,35	0,8611	0,571
Стирол (винилбензол)	$C_6H_5CH=CH_2$	-30,6	145,2	0,9060	0,749

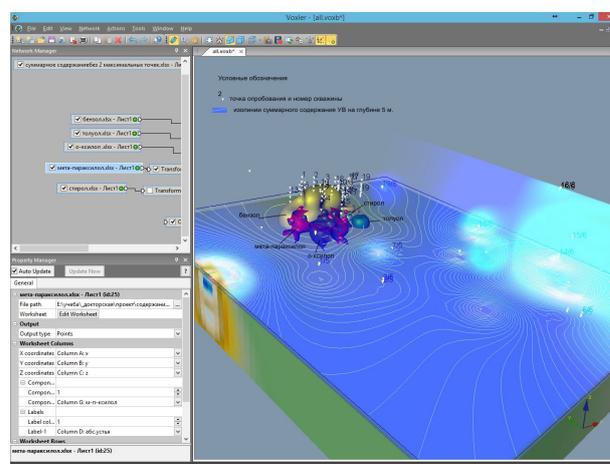


Рис. 4. 3D-модель распределения углеводородов

В результате выполненных исследований распределения концентраций углеводородов на различных уровнях разреза построены графики плотностей (рис. 5), из которых видно, что на глубине 0,25 м плотность распределения концентраций двухмодальна. При концентрации от 0 до 7 мг/100 г почвы закон распределения симметричен при модальной концентрации 1,5 г/100г почвы. На глубине 0,25 м интервал концентраций 7–10 мг/100г почвы не наблюдается. Вид кривой свидетельствует о существовании низких и высоких концентраций углеводородов. На глубине 0,75 м наблюдается асимметричное одномодальное их распределение в интервале концентраций 0–10 мг/100 г почвы.

На глубине 1,25 м распределение концентраций почти равномерно в интервале 0,5–3,5 мг/100 г почвы, а на глубине 1,75 м распределение одномодальное в интервале 0–5 мг/100 г почвы. На глубине 2,75 м наблюдается распределение с большим диапазоном изменений концентраций. На глубине 3,5 м распределение одномодальное при очень малых значениях концентраций.

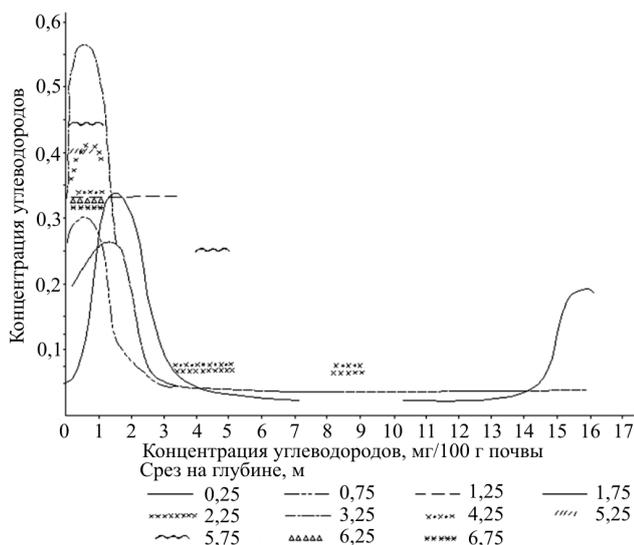


Рис. 5. Распределение концентрации углеводородов по глубине

Начиная с глубины 4,25 м наблюдается хаотичное распределение концентраций углеводородов при значениях менее 15 мг/100 г почвы. При концентрациях более 15 мг/100 г почвы частоты встречаемости на разных уровнях разрезов имеют следующие значения: 4,25 м – 0,22; 5,25 м – 0,25; 5,75 м – 0,57; 6,25–6,75 м – 0,67. Таким образом, с увеличением глубины частота появления высоких концентраций возрастает. Выполненный анализ позволяет установить два уровня распределения углеводородов по разрезу.

Первый уровень – углеводороды распределяются практически непрерывно и характеризуются выраженными модальными концентрациями. Второй уровень (начиная с глубины 4,25 м) – не наблюдается статистически непрерывных распределений углеводородов из-за малой представительности выборки. Однако с глубиной наблюдается повышение встречаемости их высоких концентраций.

Анализ показал, что нулевые концентрации практически равномерно распределяются по глубине (рис. 6). Концентрация $C = 0,5$ мг/100 г почвы наиболее часто встречается в интервале 0,5–3,0 м. $C = 1,5$ мг/100 г почвы характеризуется одномодальным распределением на глубинах 0–2,5 м.

Распределение концентраций 3,5 мг/100 г почвы аналогично вышеописанным. Начиная с концентрации 4,5 мг/100 г почвы и выше распределение по глубине хаотичное.

Анализ полученных кривых показывает, что идет направленные изменение законов

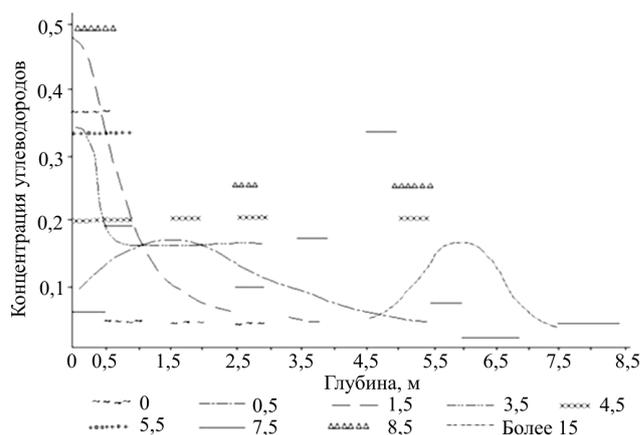


Рис. 6. Вертикальное распределение концентрации углеводородов (мг/100 г почвы)

распределения от равномерного ($C = 0$) через симметричное ($C = 0,5$ мг/100 г почвы), асимметричное ($C = 1,5–3,5$ мг/100 г почвы) к хаотичному ($C = 4,5$ мг/100 г почвы). Установленная тенденция указывает на динамику изменений концентраций углеводородов по разрезу.

Таким образом, традиционные геологические методы не позволяют достаточно надежно выявить закономерности распределения углеводородов по разрезу исследуемой толщи.

Для решения поставленной задачи использованы вероятностно-статистические методы, в частности регрессионный анализ [16], который проводился по трем выборкам. В первую вошли скважины, где наблюдается тенденция уменьшения содержания с увеличением глубины. Во вторую такие, в которых содержание углеводородов с глубиной увеличивается. Для третьей выборки отмечается хаотичное изменение углеводородов с глубиной отбора проб. Изучение взаимосвязей производилось с помощью линейной и нелинейной регрессии по девяти наиболее часто используемым в математической статистике уравнениям.

Для первого варианта уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$K = 0,353 + 0,923/x \text{ при } r = 0,79,$$

где K – концентрация углеводородов, мг/100 г почвы.

Проверим, как описывает полученная статистическая модель реальное распределение концентраций по глубине. Установлено, что из 19 скважин, пробуренных в пределах западного участка территории, в 12 реальное распределение суммы концентраций соответствует полученной модели, т.е. с глубиной

концентрации углеводороды убывают. В скв. 6, 10, 14, 19 концентрации с глубиной возрастают, т.е. имеет место инверсия модели. Данная группа скважин составляет вторую выборку для построения математической модели, связывающей изменение концентраций углеводородов с глубиной.

Расчетное уравнение регрессии для второй выборки имеет следующий вид:

$$K = -1,454 + 1,126 \cdot h \text{ при } r = 0,79.$$

Распределение углеводородов по глубине в скв. 15, 16 соответствует третьей принятой модели.

На рис. 7 приведено сопоставление полученных моделей распределения углеводородов с геологическими условиями. Первая модель соответствует условиям, когда суглинок залегает непосредственно на трещиноватых аргиллитах, алевролитах и песчаниках, при этом его мощность составляет 2–3 м. Вторая модель присуща условиям, когда суглинок залегает на высокопроницаемом щебенистом грунте, который подстилает также аргиллиты, алевролиты и песчаники. При этом мощность суглинка не превышает 1,2–1,5 м. Распределение углеводородов в скв. 15, 16 относится к третьей модели, является незакономерным, обусловлено небольшой мощностью суглинков, подстилающих различные грунты (пески, гравелистые породы), которые залегают на аргиллитах, алевролитах и песчаниках.

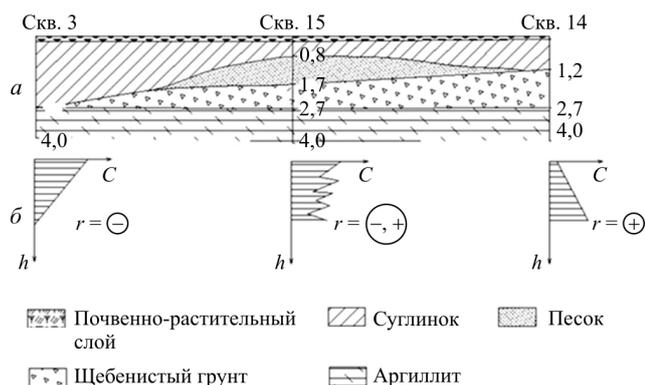


Рис. 7. Модели распределения углеводородов: *a* – геологический разрез; *б* – графики распределения углеводородов; *C* – концентрация углеводородов в почвогрунтах, мг/100 г почвы; *h* – глубина, м; *r* – коэффициент корреляции

На основе вышесказанного можно описать механизм распределения углеводородов по разрезу массива пород.

При попадании на земную поверхность под воздействием гравитационных сил углеводороды фильтруются в массив пород [26, 27]. Если не происходит дополнительное поступление углеводородов в породы, процесс фильтрации заканчивается при достижении равновесия между гравитационными силами и силами, препятствующими миграции углеводородов. Если уровень грунтовых вод достаточно высок, а масса углеводородов велика, то углеводороды ложатся на водоносный горизонт, который является флюидоупором. Затем происходит перераспределение углеводородов по разрезу. За счет гравитационных сил идет их накопление в верхней приконтактной зоне водоносного горизонта, а за счет капиллярного поднятия происходит их накопление в приповерхностной зоне разреза.

На такой процесс распределения углеводородов, естественно, существенное влияние оказывает тип пород и прежде всего их сорбционная способность, фильтрационные свойства (пористость и проницаемость) и водонасыщенность. В случае, если приповерхностная зона земли сложена песками, которые имеют низкую сорбционную способность к углеводородам, высокую открытую пористость и высокие фильтрационные свойства, зона загрязнения углеводородами будет минимальная по сравнению с тем, если бы она была сложена из глин или суглинков (см. рис. 7) [28–30].

Для оценки влияния типов грунтов на наличие аномальных концентраций проделан следующий анализ. По карте суммарных изоконцентраций в пределах западной части территории выделены две группы скважин. Первая – с повышенными концентрациями и вторая – с фоновыми концентрациями углеводородов.

На основании данных двух выборок построены гистограммы по мощностям различного типа грунтов и средней глубины их залегания. Анализировались следующие виды пород: почвенно-растительный слой, суглинок, щебенистый грунт аргиллита, насыпной грунт, алевролит, песчаник, песок. Затем определялась их индивидуальная информативность по критериям *t* и *F* с доверительной вероятностью 0,95.

Информативными показателями оказались мощность суглинка (*m*₂) и в определенной мере глубина залегания песчаников. Затем гистограммы по мощности были перестроены в вероятностную кривую, анализ которой

позволил выявить следующую закономерность: с увеличением мощности суглинка вероятность $P(A)$ высоких концентраций углеводородов закономерно возрастает.

В результате статистической обработки установлено, что на содержание углеводородов на глубине 1 м влияет наличие насыпного грунта. Нами проведен анализ зависимости количества углеводородов на глубине 1 м от мощности насыпного грунта и установлено, что при наличии последнего в среднем количество углеводородов значительно выше, чем в случае отсутствия насыпного грунта.

Выводы

Выявлены три модели распределения углеводородов по разрезу, которые контролируются геологическими условиями (литологией и глубиной залегания водоносного горизонта). На основании выявленных закономерностей разработаны математические модели, позволяющие по геологическим показателям: мощности суглинка и щебенистого грунта, а также глубине залегания песчаников – прогнозировать степень загрязнения грунтов углеводородами.

Библиографический список

1. Экологическая оценка среды обитания и состояния здоровья населения на территориях нефтедобычи Пермского края / М.В. Пушкарева, И.В. Май, В.В. Середин, Л.О. Лейбович, А.А. Чиркова, С.А. Вековшина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 2. – С. 40–45.
2. Середин В.В., Пушкарева М.В., Лейбович Л.О. Воздействие объектов хранения нефтепродуктов на геологическую среду // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2015. – № 3. – С. 23–27.
3. Середин В.В. Оценка геоэкологических условий санации территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1999. – С. 153.
4. Мазур И. Катастрофу еще можно предотвратить // Нефть России. – 1995. – № 3. – С. 4–9.
5. A method for preventing infiltration of oil and oil products into sandy soils / V.V. Usin, I.V. Kumpanenko, N.A. Ivanova, N.S. Kartasheva, A.I. Volovodov // Source of the Document Russian Journal of General Chemistry. – 2014. – Vol. 84 (11). – P. 2340–2345. DOI: 10.1134/S1070363214110553
6. Distribution of petroleum hydrocarbons in soils and the underlying unsaturated subsurface at an abandoned petrochemical site, North China / Q. Zhang, G. Wang, N. Sugiura, Z. Zhang, Y. Yang // Hydrological Processes. – 2014. – 28 (4). – P. 2185–2191. DOI: 10.1002/hyp.9770
7. Akbari A., Ardestani M., Shayegan J. Distribution and mobility of petroleum hydrocarbons in soil: Case study of the south pars gas complex, Southern Iran // Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Civil Engineering. – 2012. – 36 (C2). – P. 265–275.
8. Effect of ethanol on the biodegradation of gasoline in an unsaturated tropical soil / P. Österreicher-Cunha, Jr. E.d.A. Vargas, J.R.D. Guimarães, G.P. Lago, F.d.S. Antunes, M.I.P. da Silva // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2009. – Vol. 63 (2). – P. 208–216. DOI: 10.1016/j.ibiod.2008.09.004
9. Estimation of the time periods and processes for penetration of selected spilled oils and fuels in different soils in the laboratory / Sakari Halmemies, Siri Gröndahl, Keijo Nenonen, Tuula Tuhkanen // Spill Science & Technology Bulletin. – 2003. – Vol. 8, iss. 5–6. – P. 451–465. DOI: 10.1016/S1353-2561(03)00002-1
10. Fast prediction of the evolution of oil penetration into the soil immediately after an accidental spillage for rapid-response purposes [Электронный ресурс] / S. Grimaz, S. Allen, J.R. Stewart, G. Dolcetti. – URL: <http://www.aidic.it/CISAP3/webpapers/21Grimaz.pdf> (дата обращения: 10.12.2016).
11. Geoelectrical investigation of oil contaminated soils in former underground fuel base: Borne Sulnowo, NW Poland / B. Zogala, R. Dubiel, W.M. Zuberek, M. Rusin-Zogala, M. Steininger // Environmental Geology. – 2009. – 58 (1). – P. 1–9. DOI: 10.1007/s00254-008-1458-y
12. Halmemies S., Möttönen Y., Tuhkanen T. Mitigating accidental fuel spills through power slurping // Fire Engineering. – 2003. – Vol. 156 (5). – P. 100–105.
13. NAPL migration and ecotoxicity of conventional and renewable fuels in accidental spill scenarios / V. Malk, E. Barreto Tejera, S. Simpanen, M. Dahl, R. Mäkelä, J. Häkkinen, A. Kiiski // Environmental Science and Pollution Research. – 2014. – Vol. 21, iss. 16. – P. 9861–9876. DOI: 10.1007/s11356-014-2851-6.
14. Oil spills abatement: factors affecting oil uptake by cellulosic fibers / K.C. Payne, C.D. Jackson, C.E. Aizpurua, O.J. Rojas, M.A. Hubbe // Environmental Science and Technology. – 2002. – Vol. 46 (14). – P. 7725–7730. DOI: 10.1021/es3015524.
15. Sub-soil contamination due to oil spills in six oil-pipeline pumping stations in northern Mexico / R. Iturbe, C. Flores, A. Castro, L.G. Torres // Chemosphere. – 2005. – 68 (5). – P. 893–906. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.02.004
16. Галкин В.И., Середин В.В., Бачурин Б.А. Применение вероятностно-статистических моделей при изучении распределения углеводородов в грунтах и выборе технологий их санации / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1999. – 140 с.
17. Середин В.В. Исследование пространственного распределения углеводородов в почвогрунтах и водах на территориях, загрязненных нефтью и нефтепродуктами / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1998. – 110 с.
18. Середин В.В., Леонович М.Ф., Красильников П.А. Прогноз фильтрации углеводородов в дисперсных грунтах при разработке нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 5. – С. 106–109.
19. Середин В.В., Ядзинская М.Р. Закономерности изменения прочностных свойств глинистых грунтов,

загрязненных нефтепродуктами // Инженерная геология. – 2014. – № 2. – С. 26–32.

20. Экспериментальное изучение распространения углеводородного загрязнения в геологической среде / В.В. Середин, А.О. Стародумова, М.В. Пушкарева, Л.О. Лейбович // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 131–133.

21. Мациевский А.С., Пашков М.В., Середин В.В. о механических свойствах глин в условиях нефтеперерабатывающих предприятий // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2016. – Т. 2. – С. 428–431.

22. Ядзинская М.Р., Середин В.В. Прогноз прочностных свойств грунтов, как оснований сооружений // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2016. – Т. 2. – С. 476–478.

23. Моделирование процессов фильтрации углеводородов в газоконденсатном пласте / В.М. Зайченко, И.Л. Майков, В.М. Торчинский, Э.Э. Шпильрайн // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 5. – С. 701–706.

24. Молокова Н.В. Прикладные аспекты моделирования фильтрации жидких углеводородов в пористой среде // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 2, № 17. – С. 62–63.

25. Зайченко В.М., Майков И.Л., Торчинский В.М. Особенности фильтрации углеводородных смесей

в пористых средах // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 6. – С. 855.

26. Красильников П.А., Середин В.В., Леонович М.Ф. Исследование распределения углеводородов по разрезу грунтового массива // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–14. – С. 3100–3104.

27. Круподеров И.В., Мосейкин В.В. Моделирование углеводородного загрязнения геологической среды на территории Воронежской нефтебазы ОАО «Воронежнефтепродукт» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 11. – С. 273–281.

28. Изменение геологической среды при разработке нефтяных месторождений в сложных горно-геологических условиях / В.В. Середин, М.В. Пушкарева, Л.О. Лейбович, А.О. Бахарев, А.В. Татаркин, А.А. Филимончиков // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 153–155.

29. Середин В.В., Красильников П.А., Чижова В.А. Влияние вязкости поровой жидкости (углеводородов) на модуль деформации глины // Инженерная геология. – 2015. – № 4. – С. 60–63.

30. Середин В.В., Ядзинская М.Р. Исследования механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–6. – С. 1408–1412.

References

1. Pushkareva M.V., Mai I.V., Seredin V.V., Leibovich L.O., Chirkova A.A., Vekovshina S.A. Ekologicheskaya otsenka sredy obitaniya i sostoyaniya zdorov'ya naseleniya na territoriyakh nefte dobychi Permskogo kraia [Ecological assessment of the habitat and health status of the population in the territories of oil production in Perm Krai]. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2013, no.2, pp.40-45.

2. Seredin V.V., Pushkareva M.V., Leibovich L.O. Vozdeistvie ob"ektov khraneniya nefteproduktov na geologicheskuyu sredu [The impact of oil storage facilities on the geological environment]. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2015, no.3, pp.23-27

3. Seredin V.V. Otsenka geoeologicheskikh uslovii sanatsii territorii, zagriaznennykh nef'tiu i nefteproduktami [Assessment of geoeological conditions for the rehabilitation of areas contaminated with oil and oil products]. Perm', Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1999, p.153.

4. Mazur I. Katastrofu eshche mozno predotvratit' [The catastrophe can still be prevented]. *Nef't Rossii*, 1995, no.3, pp.4-9.

5. Usin V.V., Kumpanenko I.V., Ivanova N.A., Kartasheva N.S., Volovodov A.I. A method for preventing infiltration of oil and oil products into sandy soils. *Source of the Document Russian Journal of General Chemistry*, 2014, vol. 84 (11), pp. 2340-2345. DOI: 10.1134/S1070363214110553

6. Zhang Q., Wang G., Sugiura N., Zhang Z., Yang Y. Distribution of petroleum hydrocarbons in soils and the underlying unsaturated subsurface at an abandoned petrochemical site, North China. *Hydrological Processes*, 2014, 28 (4), pp.2185-2191. DOI: 10.1002/hyp.9770

7. Akbari A., Ardestani M., Shayegan J. Distribution and mobility of petroleum hydrocarbons in soil: Case study of the south pars gas complex, Southern Iran. *Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Civil Engineering*, 2012, 36 (C2), pp.265-275

8. Österreicher-Cunha P., Vargas Jr. E.d.A., Guimarães J.R.D., Lago G.P., Antunes F.d.S., da Silva M.I.P. Effect of ethanol on the biodegradation of gasoline in an unsaturated tropical soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2009, vol. 63 (2), pp.208-216. DOI: 10.1016/j.ibiod.2008.09.004

9. Sakari Halmemies, Siri Gröndahl, Keijo Nenonen, Tuula Tuhkanen. Estimation of the time periods and processes for penetration of selected spilled oils and fuels in different soils in the laboratory. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2003, vol.8, iss.5-6, pp.451-465. DOI: 10.1016/S1353-2561(03)00002-1

10. Grimaz S., Allen S., Stewart J.R., Dolcetti G. Fast prediction of the evolution of oil penetration into the soil immediately after an accidental spillage for rapid-response purposes, available at: <http://www.aidic.it/CISAP3/webpapers/21Grimaz.pdf> (accessed: 10 January 2016).

11. Zogala B., Dubiel, R., Zuberek W.M., Rusin-Zogala M., Steininger M. Geoelectrical investigation of oil contaminated soils in former underground fuel base: Borne Sulinowo, NW Poland. *Environmental Geology*, 2009, 58 (1), pp.1-9. DOI: 10.1007/s00254-008-1458-y

12. Halmemies S., Möttönen Y., Tuhkanen T. Mitigating accidental fuel spills through power slurping. *Fire Engineering*, 2003, vol.156 (5), pp.100-105.

13. Malk V., Barreto Tejera E., Simpanen S., Dahl M., Mäkelä R., Häkkinen J., Kiiski A. NAPL migration and ecotoxicity of conventional and renewable fuels in

accidental spill scenarios. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, vol.21, iss.16, pp.9861-9876. DOI: 10.1007/s11356-014-2851-6

14. Payne K.C., Jackson C.D., Aizpurua C.E., Rojas O.J., Hubbe M.A. Oil spills abatement: Factors affecting oil uptake by cellulosic fibers. *Environmental Science and Technology*, 2002, vol.46 (14), pp.7725-7730. DOI: 10.1021/es3015524

15. Iturbe R., Flores C., Castro A., Torres L.G. Sub-soil contamination due to oil spills in six oil-pipeline pumping stations in northern Mexico. *Chemosphere*, 2005, 68 (5), pp.893-906. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.02.004

16. Galkin V.I., Seredin V.V., Bachurin B.A. Primenenie veroiatnostno-statisticheskikh modelei pri izuchenii raspredeleniia uglevodorodov v gruntakh i vybore tekhnologii ikh sanatsii [The application of probability-statistical models in the study of hydrocarbon distribution in soils and selection of technologies for their rehabilitation]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1999, 140 p.

17. Seredin V.V. Issledovanie prostranstvennogo raspredeleniia uglevodorodov v pochvogruntakh i vodakh na territoriiakh, zagriaznennykh nef'tiu i nefteproduktami [Study of the spatial distribution of hydrocarbons in soil and water in areas contaminated by oil and oil products]. Perm', Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1998, 110 p.

18. Seredin V.V., Leonovich M.F., Krasil'nikov P.A. Prognoz fil'tratsii uglevodorodov v dispersnykh gruntakh pri razrabotke nef'tianykh mestorozhdenii [Forecast transformation of dispersed hydrocarbons in soils in the development of oil fields]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2015, no.5, pp.106-109

19. Seredin V.V., Iadzinskaia M.R. Zakonomernosti izmeneniia prochnostnykh svoistv glinistykh gruntov, zagriaznennykh nefteproduktami [Regularities of changes of strength characteristics of clay soils polluted by oil products]. *Inzhenernaia geologiya*, 2014, no.2, pp.26-32.

20. Seredin V.V., Starodumova A.O., Pushkareva M.V., Leibovich L.O. Eksperimental'noe izuchenie rasprostraneniia uglevodorodnogo zagriazneniia v geologicheskoi srede [Experimental study of hydrocarbon pollution spread in geological environment]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no.10, pp.131-133.

21. Matsievskii A.S., Pashkov M.V., Seredin V.V. O mekhanicheskikh svoistvakh glin v usloviakh neftepererabatyvaiushchikh predpriatii [About mechanical properties of the clays in conditions of petroleum-refining enterprises]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriia i praktika*, 2016, vol.2, pp.428-431.

22. Iadzinskaia M.R., Seredin V.V. Prognoz prochnostnykh svoistv gruntov, kak osnovanii sooruzhenii [Prognosis of strength properties of soils, as bases of structures]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriia i praktika*, 2016, vol.2, pp.476-478.

23. Zaichenko V.M., Maikov I.L., Torchinskii V.M., Shpil'rain E.E. Modelirovanie protsessov fil'tratsii uglevodorodov v gazokondensatnom plaste [Modeling of filtration processes of hydrocarbons in a gas condensate reservoir]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2009, vol.47, no.5, pp.701-706.

24. Molokova N.V. Prikladnye aspekty modelirovaniia fil'tratsii zhidkikh uglevodorodov v poristoi srede [Applied aspects of modeling the filtration of liquid hydrocarbons in a porous medium]. *Reshetnevskie chteniia*, 2013, vol.2, no.17, pp.62-63.

25. Zaichenko V.M., Maikov I.L., Torchinskii V.M. Osobennosti fil'tratsii uglevodorodnykh smesei v poristyykh sredakh [Features of filtration of hydrocarbon mixtures in porous media]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2013, vol.51, no.6, pp.855.

26. Krasil'nikov P.A., Seredin V.V., Leonovich M.F. Issledovanie raspredeleniia uglevodorodov po razrezu gruntovogo massiva [Study of the distribution of hydrocarbons along a section of the soil massif]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no.2-14, pp.3100-3104.

27. Krupoderov I.V., Moseiskin V.V. Modelirovanie uglevodorodnogo zagriazneniia geologicheskoi srede na territorii Voronezhskoi neftebazy OAO «Voronezhnefteprodukt» [Modeling of hydrocarbon contamination of the geological environment on the territory of the Voronezh oil base of OJSC Voronezhnefteprodukt]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2012, no.11, pp.273-281.

28. Seredin V.V., Pushkareva M.V., Leibovich L.O., Bakharev A.O., Tatarkin A.V., Filimonchikov A.A. Izmenenie geologicheskoi srede pri razrabotke nef'tianykh mestorozhdenii v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviakh [Geological environment changes during oil fields development in complex geological conditions]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no.12, pp.153-155.

29. Seredin V.V., Krasil'nikov P.A., Chizhova V.A. Vliianie viazkosti porovoi zhidkosti (uglevodorodov) na modul' deformatsii gliny [Influence of the pore fluid (hydrocarbons) viscosity on the deformation modulus of clay]. *Inzhenernaia geologiya*, 2015, no.4, pp.60-63.

30. Seredin V.V., Iadzinskaia M.R. Issledovaniia mekhanizma agregatsii chastits v glinistykh gruntakh pri zagriaznenii ikh uglevodorodami [Investigations of the mechanism of aggregation of particles in clay soils when their hydrocarbons are contaminated]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2014, no.8-6, pp.1408-1412.

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Красильников П.А., Середин В.В. Изучение закономерностей и построение математических моделей распределения углеводородов по разрезу на территориях нефтеперерабатывающих предприятий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16, №2. – С.191–200. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.2.10

Please cite this article in English as:

Krasilnikov P.A., Seredin V.V. Study of regularities and construction of mathematical models of hydrocarbon distribution in a section on territories of oil treatment enterprises. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.2, pp. 191-200. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.2.10