

## ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ГРУНТАХ ЗОНЫ АЭРАЦИИ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ КРУПНЫХ НЕФТЕХРАНИЛИЩ

А. С. Велин

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 14 ноября 2017 г.

**Аннотация:** увеличение количества транспорта, АЗС, нефтеперерабатывающих предприятий, баз хранения топлива негативно отражается на окружающей среде. Загрязняющие элементы попадают в почву и грунты через проливы при использовании топливных резервуаров, путем сноса дождевых осадков, а также испарением. В данной статье рассматривается миграция нефтяных углеводородов в грунтах зоны аэрации, подземных водах. Чаще всего этот процесс приводит к образованию линзы с избыточным содержанием нефтепродуктов. Площадь такой линзы, контактирующей с поверхностью грунтовых вод, может достигать 20–30 Га и более. Особое внимание уделяется специфике строения и свойств грунтов зоны аэрации. При проникновении углеводородов в обводненную грунтовую толщу формируется ореол загрязнения, значительно превышающий исходный объем поступающих веществ. Во второй половине статьи в качестве примера дается описание загрязнения на территории комбината «Красное Знамя», расположенного в городе Воронеже по адресу ул. Димитрова 147. Приведены схемы распространения различных форм нефтяного загрязнения, наблюдательная сеть района нефтепродуктов. Схемы поясняют, что главным очагом загрязнения является линза условно чистого нефтепродукта, развитая на участке расположения слива – наливной эстакады. Концентрация нефтепродуктов в грунтовых водах в пределах площади нефтехранища превышает ПДК.

**Ключевые слова:** загрязнение геологической среды, линза, эмульгированные углеводороды, нефтепродукты, грунты, топливо, нефтехранилище, техногенные условия, природная среда.

### PECULIARITIES OF MIGRATION OF HYDROCARBONS IN THE SOILS OF THE AERATION AREA IN THE LOCATIONS OF LARGE OIL RESERVOIRS

**Abstract:** an increase in the number of transport, filling stations, refineries, fuel storage bases negatively affects the environment. Polluting elements enter the soil and ground through the straits by using fuel tanks, drifting rain, and evaporation. This article considers the migration of petroleum hydrocarbons in the soils of the aeration zone, underground waters. Most often this process leads to the formation of a lens with an excessive content of petroleum products. The area of such a lens in contact with the surface of groundwater can reach 20 - 30 hectares or more. Particular attention is paid to the specific structure and properties of soils in the aeration zone. With the penetration of hydrocarbons into the watered ground, a halo of pollution is formed, significantly exceeding the initial volume of incoming substances. In the second half of the article, as an example, a description is given of the contamination on the territory of the Krasnoe Znamya Combine, located in the city of Voronezh at ul. Dimitrov 147. The schemes of distribution of various forms of oil pollution, the observational network of the oil products area are given. Schemes explain that, the main focus of pollution is the lens of a conventionally clean oil product, developed on the site of the discharge - the loading rack. The concentration of petroleum products in groundwater within the area of oil storage exceeds the MPC.

**Key words:** pollution of the geological environment, cleaning, preparations, oil products, soils, fuel, oil storage, technogenic conditions, natural environment.

#### Введение

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 нефтепромыслов источниками длительного поступления углеводородов в грунтовую толщу служат шламовые амбары – накопители буровых шламов и места сброса сточных вод. Активное загрязнение подземной среды происходит при их транспортировке

системой магистральных и вспомогательных трубопроводов, железнодорожным и автомобильным транспортом, а также при хранении и переработке углеводородов на территориях нефтеперерабатывающих заводов, накопителей отходов различных производств – обогатительных фабрик и т.д. В пределах городских территорий поступление углеводородов нефти в грунтовую толщу связано с деятельностью резервуарных парков, сливно-наливных пунктов, ремонтных мастерских автомашин, моечных площадок и автозаправочных станций (АЗС).

### Поступление углеводородов в подземные воды

Миграция нефтяных углеводородов в подземных водах носит более сложный характер, чем в зоне аэрации и может осуществляться в нескольких формах: в виде исходной жидкой фазы, тонкодисперсной эмульсии, а также истинного раствора. Наиболее часто распространение нефтяных веществ происходит в виде однофазного жидкого слоя и/или молекулярного (истинного) раствора [1].

Существование на границе зоны аэрации и водонасыщенной толщи, а в некоторых случаях, зоны капиллярной каймы, некоторого «порогового» давления, наряду с низкой плотностью углеводородов по отношению к воде (для большинства плотность  $< 1 \text{ г/см}^3$ ), приводит к формированию линзы с избыточным содержанием нефтяных углеводородов. Указанная линза представляет собой концентрирование легко- и слабо подвижных углеводородов с низкой плотностью в виде локальной зоны полного углеводородного насыщения грунтов, расположенной непосредственно над зеркалом грунтовых вод (рис. 1).

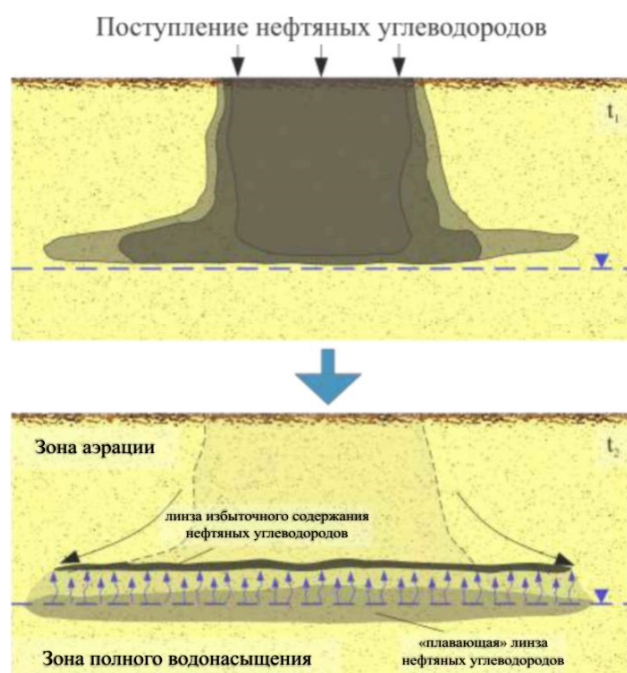


Рис. 1. Схема формирования линзы избыточного содержания нефтяных углеводородов во времени  $t_1 - t_2$  [5].

Возникновение углеводородной линзы обычно происходит в грунтах с относительно невысокой водопроницаемостью. Мощность такой линзы в зависимости от гидрогеологических условий, а также длительности и интенсивности поступления нефтяных веществ, изменяется от нескольких сантиметров до 2–3 м и более, при этом максимальные значения мощности отмечаются в центральной части, минимальные – в краевых частях. Площадь линзы, контактирующей с поверхностью грунтовых вод, может достигать 20–30 га и более [2].

При оценке углеводородного загрязнения грунтов и подземных вод плавающая линза углеводородов, чаще всего, представляет собой главное ядро загрязнения, для которого характерны следующие особенности: возможность увеличения мощности и площади распространения при непрерывном поступлении углеводородов; смещение вдоль зеркала грунтовых вод, как по направлению потока, так и в противоположном направлении; перемещение в вертикальном направлении за счет колебания уровня грунтовых вод (повышение уровня приводит к увеличению мощности линзы в результате дополнительного загрязнения грунтов зоны аэрации и смещения газообразных нефтепродуктов, понижение – к уменьшению за счет сорбции части углеводородов на поверхности грунтов) и др.

Ниже линзы жидких углеводородов на поверхности грунтовых вод выделяется зона пленочного растекания, представленная жидкими углеводородами. По мнению проф. В. М. Гольдберга данная форма является прямой альтернативой скоплению в форме «плавающая линза». Это объясняется тем, что образование последней происходит в грунтах с низкой проницаемостью, в то время как образование «пленки» происходит на контакте зеркала грунтовых вод с высокопроницаемыми грунтами (например, крупнообломочными). Вполне понятно, что отличительными особенностями углеводородных «пленок» являются их незначительная толщина и большая площадь распространения, которая в некоторых случаях может превышать площадь распространения плавающей линзы. Значимость учета образования углеводородных пленок на поверхности грунтовых вод подчеркивается тем, что в силу определенных гидрогеологических условий образование линз может не происходить, вместе с тем, формирование углеводородных пленок при достижении нефтяными веществами уровня грунтовых наблюдается практически всегда (рис. 2).

Непосредственно под углеводородной пленкой концентрирование в грунтовых водах происходит в виде водно-эмульгированных частиц и растворенных углеводородных соединений (прежде всего, ароматических и циклопарафиновых). Зачастую совместно с указанными формами в верхней части грунтовых вод происходит растворение углеводородных газов, а также некоторых не углеводородных соединений, входящих в состав нефти. Источниками поступления растворимых или эмульгированных углеводородов могут быть как плавающая линза или зона пленочного

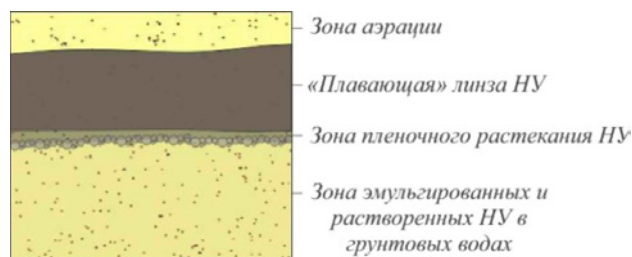


Рис. 2. Зональность форм миграции нефтяных углеводородов в подземных водах (по В.М. Гольдбергу, 2001 г. [10])

растекания, так и сточные воды, содержащие в своем составе уже растворенные и/или эмульгированные углеводороды.

При более детальном рассмотрении процессов растворения некоторых углеводородов в воде под крупной плавающей линзой можно сказать, что при движении от нижней границы углеводородной линзы к поверхности грунтовых вод происходит постепенное уменьшение количества углеводородов в эмульгированной форме и увеличение водорастворимых фракций до некоторого максимума концентрации, после чего их дальнейшая миграция происходит под действием градиента концентрации, т.е. происходит диффузия растворимых углеводородов из области их большего содержания в области меньших концентраций, характерных для нижележащих грунтовых вод. Из этого следует несколько выводов: чем выше содержание углеводородов в плавающей линзе, тем выше их содержание в эмульгированных частицах жидких углеводородов, и соответственно, в так называемой «переходной» зоне между линзой и зеркалом грунтовых вод. В свою очередь, чем ближе плотность и вязкость к соответствующим свойствам воды, тем выше смешение жидких нефтяных веществ с водой, и соответственно, выше концентрация углеводородов в эмульгированной форме, что приводит к увеличению интенсивности процессов растворения и повышению их концентрации. Таким образом, мощность зоны растворенных и эмульгированных углеводородов во многом зависит от содержания водорастворимых компонентов, а также плотности и вязкости собственно жидких углеводородов. Аналогичные процессы протекают и при рассмотрении пленочного растекания.

Стоит отметить, что в случае загрязнения подземных вод сточными водами, в составе которых уже содержатся углеводороды в растворенной форме или в виде эмульсий, указанные компоненты в начальный момент времени скапливаются в верхней части грунтовых вод, затем при достижении определенной концентрации растворенные углеводороды перемещаются в нижние горизонты подземных вод. В целом, величина зоны распространения растворенных и/или эмульгированных углеводородов зависит от размеров плавающей линзы или углеводородной пленки, а в некоторых случаях, объема поступающих сточных вод. Очевидно, что, как и другие формы нахождения углеводородов (линзы или пленки), нефтяные веще-

ства в растворенном или эмульгированном виде, также подвержены влиянию динамики грунтовых вод. Они способны смещаться по движению потока и распространяться во всех направлениях, перемещаться в вертикальном направлении при колебании уровня грунтовых вод, а также загрязнять нижележащие горизонты подземных вод в случае нисходящего перетекания грунтовых вод.

Особое внимание следует уделить особенностям миграции в грунтовых водах тяжелых углеводородов (плотность выше единицы), входящих в состав тяжелых мазутов и различных промышленных масел. Поступление указанных веществ в подземные воды возможно только в том случае, если на поверхности земли развит рыхлый почвенный покров, зона аэрации имеет небольшую мощность и представлена высокопроницаемыми грунтами. В противном случае, тяжелые углеводородные фракции скапливаются на поверхности почв и в верхней части зоны аэрации.

Поступая в грунтовые воды, сильновязкие, практически несмешивающиеся с водой углеводороды под действием сил гравитации накапливаются в нижних частях водоносного горизонта. При этом с момента их поступления в грунтовые воды начинают развиваться процессы разделения поступающих углеводородов. Легкие, менее плотные компоненты всплывают к поверхности грунтовых вод с образованием или дополнением углеводородной пленки, происходит переход части нефтяных веществ в растворимую форму, прежде всего, это относится к ароматическим, циклопарафиновым и другим углеводородам, содержание которых в составе различных мазутов и масел может достигать порядка 40 % [3, 4]. Тем временем, наиболее тяжелые и вязкие компоненты достигают подошвы грунтовых вод и накапливаются на подстилающем водоупоре. Приведенный механизм миграции тяжелых углеводородов в грунтовых водах возможен только в однородной, высокопроницаемой толще, в свою очередь, если в разрезе водонасыщенной толщи находятся слабопроницаемые отложения, то их наличие, так же, как и в зоне аэрации, способно изменить направление миграции углеводородов. В результате этого большая часть наиболее плотных и вязких углеводородов концентрируется на поверхности слабопроницаемых прослоев, не достигая подошвы водоносного горизонта.

Из сказанного выше становится понятным, что особенности миграции нефтяных углеводородов в подземных водах во многом предопределяются спецификой строения и свойств грунтов зоны аэрации. Тесная взаимосвязь подземных вод с грунтами зоны аэрации имеет особое значение при рассмотрении вопроса миграции нефтяных линз и/или плёнок, эмульгированных и растворенных углеводородов при колебании уровня грунтовых вод. Так, при повышении уровня грунтовых вод под действием природных и техногенных факторов происходит их взаимодействие с грунтовой толщей зоны аэрации, которое может иметь следующие результаты:

- если распространение не достигло зеркала грунтовых вод и подземные воды имеют относительной чистый, свободный от углеводородов, химический состав, то при повышении уровня происходит их загрязнение нефтяными веществами различных форм, содержащимися в грунтах зоны аэрации.
- при условии, что миграция достигла зеркала грунтовых вод и загрязненными оказываются как зона аэрации, так и грунтовые воды, то в результате повышения уровня может происходить как одновременное увеличение степени их поражения, так и загрязнение только одной из указанных зон. Стоит отметить, что результатом такого загрязнения может быть выход углеводородов нефти на земную поверхность, особенно в условиях наличия естественных или техногенных понижений рельефа (в том числе в заглубленных частях зданий и сооружений – подвалах, коробах и коллекторах подземных инженерных коммуникаций и др.).
- в случае если загрязнение грунтовой толщи произошло на некотором локальном участке и привело к формированию различных форм нефтяного загрязнения подземных вод, перемещенных под действием динамики водного потока на некоторое расстояние, то повышение уровня грунтовых вод приведет к соединению с ранее незагрязненными грунтами зоны аэрации.

При понижении уровня грунтовых вод, часть загрязняющих веществ в различных формах удерживается в грунтах под действием различных химических и физико-химических процессов, что приводит к формированию так называемого «вторичного» источника техногенного загрязнения подземных вод [5].

Таким образом, можно заключить, что при попадании углеводородов нефти в обводненную грунтовую толщу формируется ореол загрязнения, значительно превышающий исходный объем поступающих углеводородов. При этом площадь контактов нефтяных углеводородов с водой возрастает (в сравнении с начальной ситуацией, когда имело место концентрированное скопление углеводородов), что приводит к более интенсивному их растворению в подземных водах. Таким образом, при загрязнении обводненной грунтовой толщи более серьезную опасность представляет распространение в грунтовых водах растворенных углеводородов, которые могут перемещаться с грунтовым потоком на большие расстояния от исходного места загрязнения.

На основе немногочисленных исследований, посвященных миграции в подземных водах, известно лишь несколько схем, составленных профессорами В. М. Шестаковым (2001 г), Б. В. Боревским с соавторами (1997 г) и др. (рис. 3, 4). Различие представленных схем заключается в количестве выделяемых зон, в каждой из которых углеводороды содержатся в различном фазовом состоянии. Стоит отметить, что, по мнению автора, наиболее полно реальным условиям нахождения в грунтах зоны аэрации и подземных водах, отвечает зональность, составленная проф. В.М. Гольдбергом, согласно которой при техногенном загрязнении грунтов нефтяными углеводородами в разрезе грунтовой толщи следует выделять восемь зон – от газообразных углеводородов до зоны скопления тяжелых углеводородов в подземных водах [5].



Рис. 3. Схема распространения различных форм нефтяного загрязнения в грунтовых водах по [9].

### Загрязнение грунтов зоны аэрации на базе топлива «Красное знамя»

Не обошла стороной эта проблема и предприятие «Красное Знамя», представляющее собой крупное государственное нефтехранилище.

База нефтепродуктов расположена в левобережной части г. Воронежа, по ул. Димитрова 147 (рис. 4). Территория предприятия первой группы складирования эксплуатируется с 1938, 1940 гг. Железнодорожная эстакада введена в действие с 1951 г. На первых этапах эксплуатации промышленной площадки осуществлялось хранение авиационного бен-

зина, в том числе этилированного, и спирта-ректификата.

При длительном сроке эксплуатации объектов, работающих с нефтепродуктами, загрязнение геологической среды является неизбежным следствием самого факта существования нефтехранилищ. Загрязнению оказались подвержены почвы и грунты зоны аэрации, грунтовые воды четвертичного водоносного горизонта.

Главным очагом загрязнения является линза условно чистого нефтепродукта, развитая на участке расположения сливо-наливной эстакады.



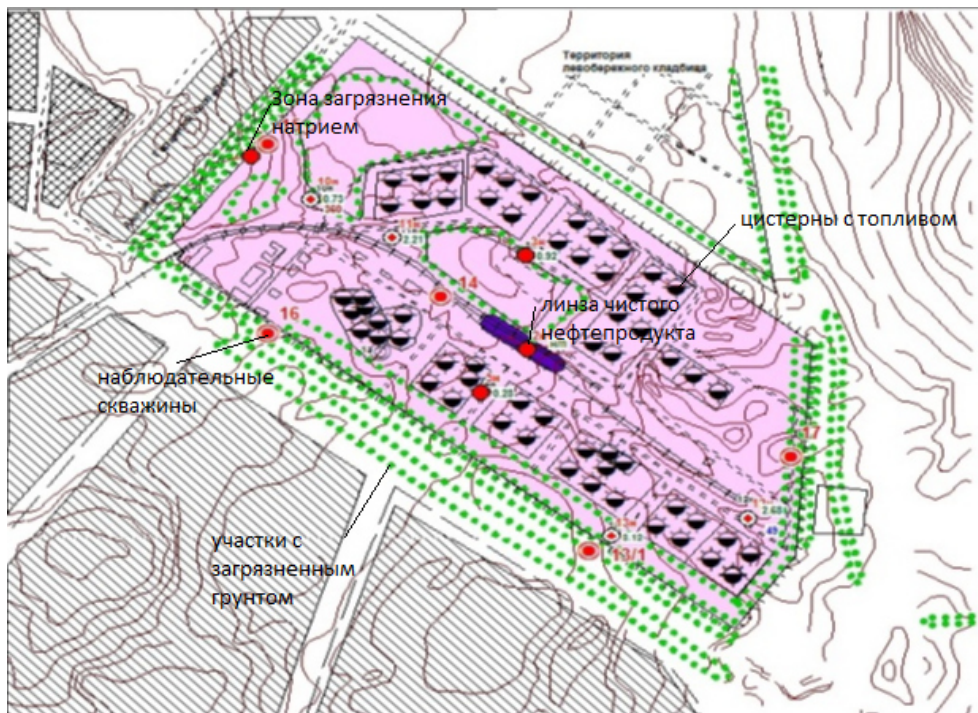


Рис. 4. Схема наблюдательной сети района нефтехранилища «Красное Знамя» [7].

Концентрации нефтепродуктов в грунтовых водах в пределах площадки нефтехранилища превышают ПДК. Основное загрязнение сосредоточено в верхней зоне водоносного горизонта, с глубиной концентрации нефтепродуктов снижаются. В водозаборных скважинах 1э и 2э, эксплуатирующих воды неогенового водоносного горизонта, углеводородное загрязнение не отмечено [6, 7].

К позитивным, с точки зрения экологической безопасности, моментам можно отнести отсутствие в непосредственной близости от площадки нефтехранилища природных объектов первоочередной защиты

от загрязнения (питьевые водозаборы, колодцы, реки). С учетом того, что линза условно чистого нефтепродукта достаточно инертна в своей динамике (низкие скорости перемещения и растворения нефтепродуктов) в ближайшей перспективе вряд ли можно ожидать ее развития за пределы центральной зоны площадки предприятия (рис. 5).

Вполне понятно, что при отсутствии зоны аэрации, трансформация большей части нефтяных углеводородов будет происходить за счет деятельности микробных биоценозов, вклад химического окисления менее значителен [11].

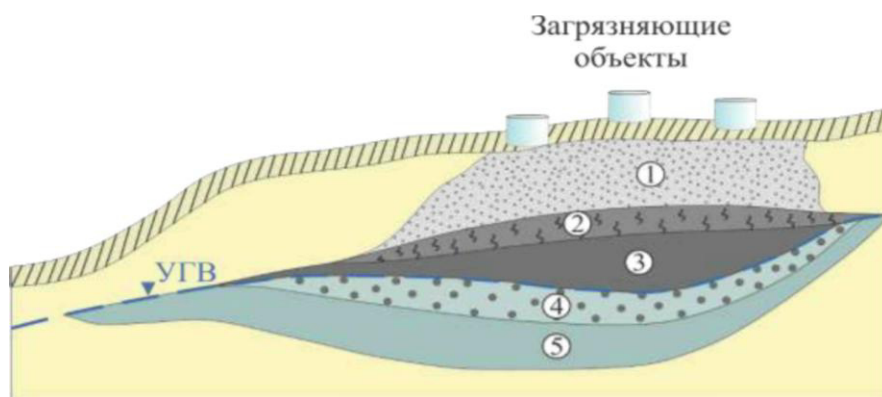


Рис. 5. Обобщенная схема углеводородного загрязнения геологической среды базы топлива «Красное Знамя» [17]: 1 – зона газообразных углеводородов, 2 – зона защемленных углеводородов, 3 – зона углеводородного насыщения (линза жидких нефтепродуктов), 4 – зона капельных углеводородов в воде, 5 – зона эмульгированных и растворенных углеводородов, УГВ – уровень грунтовых вод [8].

### Выводы

Нефтяные углеводороды представляют собой сложную смесь органических соединений, основная масса которой (более 90 %) представлена углеводородами четырех гомологических рядов: парафинами (алканами), нафтенами (циклоалканами), ароматическими (аренами) и гибридными соединениями (пара-

фино-нафтенно-арены), отличающимися друг от друга особенностями строения углеводородной цепи – её длиной, пространственным положением (открытостью или закрытостью), а также наличием в составе гетероциклических соединений, что предопределяет их свойства и условия преобразования.

Основными продуктами преобразования нефтяных

углеводородов в промышленных условиях являются различные углеводородные фракции: бензины, керосины, соляровые масла, мазуты и др., каждая из которых содержит в своем составе определенный углеводородный набор веществ, определяющий их физические, физико-химические и химические свойства – плотность, вязкость, испаряемость, растворимость, а также способность к сорбции [8, 9].

Загрязнение почвенного покрова нефтяными углеводородами приводит к образованию профиля углеводородного загрязнения, закономерности формирования которого обусловлены многокомпонентностью состава и особенностями строения почвенного профиля – системой почвенно – геохимических барьеров и их свойствами, количеством и формой почвенной влаги. Миграция углеводородов в зоне аэрации носит сложный многофазный характер и представлена в виде системы взаимодействий: нефтяные углеводороды – грунт – воздух, учитывающей специфику строения и свойств углеводородов и вмещающих грунтов, а также наличие некоторого «порогового» давления, определяющего возможность их дальнейшей миграции в водонасыщенной среде.

В подземных водах миграция нефтяных углеводородов, характеризующихся различными значениями плотности, вязкости и растворимости по отношению к воде, может происходить в виде линзы или плёнки жидких углеводородов на поверхности зеркала грунтовых вод, а также в эмульгированном или растворенном виде внутри водоносного горизонта. Исключением являются тяжелые, малорастворимые углеводороды, миграция которых может приводить к их накоплению в местах локальных неоднородностей или подошве водоносного горизонта [12].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бочаров, В. Л. Мониторинг природно-технических экосистем / В. Л. Бочаров, Ю. М. Зинюков, Л. А. Смоляницкий. – В.: Истоки, 2000. – 226 с.

2. Бочаров, В. Л. Экологические проблемы малых городов России / В. Л. Бочаров, М. Н. Бугреева // Вторая Всероссийская научно-практическая конференция «Антропогенное воздействие и здоровье человека»: Тез. Док. – К. – 1995. – С. 11–12.

3. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль качества. – Введ. 1985-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с.

4. Гоголь, С. Б. Опыт очистки геологической среды от нефтяного загрязнения на территории г. Брянска / С. Б. Гоголь, С.В. Дадькин // Геологич. вестник центральных районов России. – 1999. – №1–2. – С. 7–78.

5. Дашко, Р. Э. Проблемы загрязнения и очистки подземных вод и грунтов от нефтяных углеводородов в Санкт-Петербургском регионе / Р. Э. Дашко, Н. С. Петров // Современные проблемы гидрогеологии. Пятые толстихинские чтения: материалы науч.-метод. конф. – Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб. – 1996. – С.132–134.

6. Дурнев, Ю. Ф. Геоэкологические особенности промплощадок нефтебаз г. Воронежа / Ю. Ф. Дурнев // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 1997. – №4. – С.154–158.

7. Зинюков, Ю.М. Методические основы конструирования и анализа структурно-иерархических моделей природно-технических экосистем / Ю.М. Зинюков // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2001. – №11. – С.210 – 222.

8. Зинюков, Ю. М. Методические основы организации мониторинга природно-технических экосистем на основе их структурно-иерархических моделей/ Ю.М. Зинюков // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2002. – №13. – С. 235 – 242.

9. Королев, В. А. Мониторинг геологической среды. / В. А. Королев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 272 с.

10. Методические рекомендации по выявлению и оценке загрязнения подземных вод / Сост. В. М. Гольдберг, С. Г. Мелькановицкая, В.М. Лукьянчиков. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1990. – 76 с.

11. Методические рекомендации по геохимическому изучению загрязнения подземных вод / Сост. С. Р. Крайнов [и др.]. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1991. – 106 с.

12. Методические рекомендации по организации и ведению мониторинга подземных вод (изучение режима химического состава подземных вод). – М.: ВСЕГИНГЕО, 1985. – 76 с.

*Воронежский Государственный Университет*

*Велин Артём Сергеевич, аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии  
E-mail: velin.artem@mail.ru  
Тел.: 8-951-087-30-22, 8-950-763-60-03*

*Voronezh State University*

*Velin A. S., Graduate student of the Hydrogeology, Engineering Geology and Geoecology Department  
E-Mail: velin.artem@mail.ru  
Tel.: 8-950-763-60-03, 8-951-087-30-22*