

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

Институт наук о Земле
Кафедра экологической геологии

Лескова Полина Геннадьевна

**Экогеологическая оценка миграции легких нефтепродуктов в
горнодобывающем районе месторождения «Золотинка»
(Хабаровский край)**

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению 022000 «Экология и природопользование»

Научный руководитель:
доктор геол.-мин. наук,
проф. Куриленко В. В.

Зав. кафедрой:
доктор геол.-мин. наук,
проф. Куриленко В. В.

Санкт-Петербург
2017 г.

Оглавление

Введение.....	3
1. Литературный обзор по теме исследования	5
1.1. Гидрогеохимическая миграция.....	5
1.1.1. Конвективный перенос.....	5
1.1.2. Диффузионно-дисперсионные процессы	6
1.1.3. Миграция многофазных жидкостей.....	8
1.2. Особенности гидрогеохимической миграции легких нефтепродуктов ...	12
1.2.1. Химический состав легких нефтепродуктов.....	12
1.2.2. Физические и физико-химические свойства легких нефтепродуктов	14
1.2.3. Формы нахождения легких нефтепродуктов в геологической среде ..	15
1.2.4. Межфазный обмен и биodeградация легких нефтепродуктов	17
1.2.5. Миграция самостоятельной и растворенной фазы легких нефтепродуктов.....	22
1.3. Биологическое действие легких нефтепродуктов.....	24
2. Описание объекта исследования.....	27
2.1. Физико-географические условия.....	27
2.1.1. Орография	27
2.1.2. Климат	28
2.1.3. Гидрология	28
2.1.4. Гидробиологическая характеристика	29
2.2. Геологическое строение	29
2.3. Гидрогеологические условия.....	31
3. Методика исследования.....	33
3.1. Геофильтрационное моделирование	34
3.1.1. Схематизация природных условий	34
3.1.2. Калибровка модели.....	38
3.2. Геомиграционное моделирование	39

3.3.	Расчет миграции линзы легких нефтепродуктов	44
3.4.	Оценка экологического ущерба от загрязнения водных объектов	45
4.	Результаты исследования	47
4.1.	Геофильтрационное моделирование	47
4.2.	Геомиграционное моделирование	48
4.3.	Миграция линзы легких нефтепродуктов.....	60
4.4.	Оценка экологического ущерба от загрязнения водных объектов	61
5.	Разработка природоохранных мероприятий.....	64
	Заключение	67
	Список литературы	69

Введение

В настоящее время в проблеме загрязнения геологической среды все более важную роль играют нефтепродукты, которые представляют собой сложную смесь органических веществ.

Это связано с тем, что загрязнение нефтепродуктами происходит на всех этапах хозяйственной деятельности человека, начиная с потерь нефти при ее добыче, переработке и транспортировке, заканчивая утечками из поверхностных и подземных хранилищ углеводородного топлива. Таким образом, можно говорить о том, что поступление нефтепродуктов в геологическую среду происходит повсеместно и постоянно.

В первую очередь загрязнение геологической среды нефтепродуктами сказывается на подземных водах, так как они являются ее наиболее подвижным компонентом. Эта особенность обуславливает широкое распространение загрязнения в геологической среде с подземными водами. Кроме того, в результате разгрузки загрязненных подземных вод в водоемы и водотоки, происходит загрязнение нефтепродуктами поверхностных вод, распространяясь в которых, загрязняющие вещества наносят ущерб объектам природной среды и приводят к повреждению и разрушению экосистем.

В настоящем исследовании в качестве объекта для изучения данной проблемы была выбрана территория, в пределах которой расположен потенциальный источник загрязнения подземных вод нефтепродуктами – склад горюче-смазочных материалов (ГСМ). Изучаемая территория расположена в горнодобывающем районе месторождения «Золотинка» в Хабаровском крае, на котором в настоящее время ведется добыча упорного золота.

Цель данной выпускной квалификационной работы – экогеологическая оценка миграции легких нефтепродуктов в районе месторождения «Золотинка».

Задачи работы:

1. Изучение физико-географических, геологических, гидрогеологических и экологических условий месторождения Золотинка.
2. Изучение теоретических основ миграции нефтепродуктов с подземными водами.
3. Изучение основ физико-химического взаимодействия и преобразования загрязнения нефтепродуктами в многофазной среде (подземные воды – горные породы - воздух).
4. Построение геофильтрационной модели исследуемой территории в компьютерной программе Visual Modflow Classic.

5. Построение модели миграции растворенных нефтепродуктов в случае наступления двух различных внештатных ситуаций в программе Visual Modflow Classic.
6. Оценка ареалов распространения потенциального загрязнения, в случае наступления внештатных ситуаций.
7. Оценка миграции жидких скоплений легких нефтепродуктов в виде несмешивающейся с водой жидкости.
8. Оценка возможных экологических ущербов, нанесенных природной среде от потенциального загрязнения нефтепродуктами.
9. Разработка природоохранных мероприятий.

В работе использовалась компьютерная программа Visual Modflow Classic 2011. 1, опубликованные литературные источники, а также фондовые материалы.

1. Литературный обзор по теме исследования

1.1. Гидрогеохимическая миграция

Гидрогеохимическая миграция – направленное изменение вещественного состава подземных вод и количества находящегося в них вещества, которое проявляется в изменении химического и газового составов, минерализации [25].

В данном разделе будут рассмотрены особенности миграции компонентов подземных вод, при которой мигрирующий раствор представляет собой однофазную систему, а жидкости разного состава являются смешивающимися. В таком случае миграция компонентов осуществляется в рамках их конвективного переноса и диффузионно-дисперсионного рассеяния, на которые накладываются физико-химические процессы превращений вещества в подземных растворах и его взаимодействия с горными породами. Данные процессы массопереноса характерны для миграции растворенных компонентов нефтепродуктов в водной фазе.

Так же в данном разделе будет дано описание многофазной фильтрации, которая характеризует миграцию несмешивающихся с водой жидкостей. Этот процесс описывает миграцию нефтепродуктов, которые в подземной гидросфере находятся в свободной фазе.

1.1.1. Конвективный перенос

Конвективный перенос можно определить как механический (гидравлический) перенос фильтрационным потоком без отделения от него, т.е. при этом считается, что вещество или тепло перемещается со средней действительной скоростью, которая определяется следующим соотношением:

$$u = \frac{v}{n_a} = \frac{k \cdot I}{n_a}$$

где u – действительная скорость фильтрации, м/сут; v – скорость фильтрации, м/сут; n_a – активная пористость; k – коэффициент фильтрации, м/сут; I – градиент напора [10].

Так как скорости перемещения вещества или тепла фильтрующимся потоком усредняются – согласно вышеописанной формуле, то в таком представлении конвективный перенос должен характеризоваться резкой границей раздела между вытесняющей и вытесняемой жидкостью, т.е. перемешивания нет, и говорят о поршневом вытеснении одной жидкости другую. При плановой фильтрации в однородном пласте двух жидкостей с одинаковой плотностью фронт вытеснения нормален к поверхности напластования. Ситуация, однако, заметно усложняется, если

плотности жидкостей различны: фронт вытеснения, в частности, отклоняется от нормали к напластованию – более тяжелая жидкость занимает вблизи фронта нижнюю часть пласта [10].

1.1.2. Диффузионно-дисперсионные процессы

Диффузионно-дисперсионные явления при миграции вещества приводят к размытию контакта взаимно вытесняющих растворов.

К данным явлениям относятся молекулярная диффузия и механическая дисперсия, которые в совокупности составляют гидродисперсионный перенос вещества в подземных водах.

Молекулярная диффузия является процессом «самопроизвольного» переноса вещества под действием градиента его концентрации. При этом общий поток вещества через единичное расчетное сечение направлен в сторону уменьшения концентрации и определяется законом Фика:

$$J_{D_M} = -D_M \cdot \frac{\partial c}{\partial l}$$

где J_{D_M} – плотность диффузионного потока вещества; D_M – коэффициент молекулярной диффузии, характеризующий подвижность водорастворенных компонентов при их миграции в пористой среде под действием разности химических потенциалов, м²/сут; $\frac{\partial c}{\partial l}$ – градиент концентрации [12, 25].

Молекулярно-диффузионный перенос особенно важен при малых скоростях фильтрации, в первую очередь – при переносе через слабопроницаемые образования. При миграции вещества в стратифицированных пластах, представленных элементами с различной проницаемостью (прослоями и линзами глин в песчаных отложениях, пористыми блоками и трещинами), молекулярная диффузия действует как фактор, направленный на выравнивание концентраций, обуславливая отток вещества из более проницаемых элементов (по которым идет основной конвективный перенос) к менее проницаемым. В результате она способствует образованию на фронте вытеснения одного раствора другим переходной зоны, с постепенно меняющейся концентрацией, и снижает скорость его перемещения [19].

По такому внешнему проявлению с молекулярной диффузией ассоциируется еще один механизм переноса вещества – **механическая дисперсия**. Однако природа этого явления существенно иная: данный процесс объясняется двумя эффектами: 1) динамическим – локальной изменчивостью поля скоростей фильтрации и 2) кинематическим – «ветвлением» траекторий движения. Их сочетание внешне

проявляется подобно диффузионному процессу, способствуя образованию переходных по концентрации зон между вытесняющим и вытесняемым растворами [19].

Согласно экспериментам, механическая дисперсия, также подчиняется закону Фика, изложенному выше, однако при замене коэффициента молекулярной диффузии D_M на другой параметр – коэффициент механической дисперсии D_d . Механическая дисперсия складывается из механических дисперсий в продольном и поперечном направлении. Сначала рассмотрим продольную механическую дисперсию, ориентированную по направлению конвективного потока [10, 12].

При достаточно больших скоростях фильтрации в однородных грунтах величина коэффициента механической дисперсии оказывается примерно пропорциональной скорости фильтрации:

$$D_L = \alpha_L \cdot v$$

где D_d – коэффициент продольной механической дисперсии, м²/сут; α_L – продольная дисперсивность отражает геометрию порового или трещинного пространства, зависит от длины переноса, м; v – скорость фильтрации, м/сут [10, 12].

Важно отметить, что дисперсия может идти не только вдоль направления фильтрационного потока, как рассматривалось выше, но и в перпендикулярном к нему направлении. Такая – поперечная – дисперсия также подчиняется закону Фика, но с иным коэффициентом D_H , имеющим вид:

$$D_H = \alpha_H \cdot v$$

где D_H – коэффициент поперечной дисперсии, м²/сут; α_H – поперечная дисперсивность, м [10, 12].

Аналогия в характере проявления молекулярной диффузии и механической дисперсии способствовала их объединению через суммарный коэффициент, который характеризует **гидродисперсионный перенос** вещества:

$$D = D_M + D_d$$

где D – коэффициент гидродисперсии [10].

Соответственно суммарное рассеяние вещества, вызываемое гидродисперсией или просто дисперсией, определяется законом Фика в виде:

$$J_D = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial l}$$

Доли молекулярно-диффузионного и механического дисперсионного массопереноса в общем балансе массового потока определяются скоростью фильтрации v и структурой горных пород (для однородных пород – характерным размером минеральных зерен d_3). Так, из результатов лабораторных экспериментов следует, что

при значениях vd_3 , равных $0,0001 \text{ м}^2/\text{сут}$ и менее, доминирующей является молекулярная диффузия, а при значении vd_3 , измеряемом сотыми-десятыми долями квадратных метров в сутки, резко преобладает уже механическая дисперсия. Грубо говоря, в породах глинистого состава обычно можно учитывать только молекулярную диффузию, в трещиноватых породах – только механическую дисперсию, но в остальных случаях допустимость пренебрежения одной из составляющих диффузионно-дисперсионного рассеяния обычно требует более внимательного обоснования [10].

1.1.3. Миграция многофазных жидкостей

До сих пор мы рассматривали ситуации, в которых мигрирующий раствор представлял собой однофазную систему, а жидкости разного состава были смешивающимися. Между тем, многочисленные химические соединения, находящиеся в жидком состоянии, не смешиваются с водой. При миграции в горных породах они, занимая часть порового пространства, формируют самостоятельную фазу, находящуюся в контакте с водной или воздушной фазами. При этом процесс сопровождается межфазовым массообменом, что приводит к формированию ореолов загрязнения подземных вод растворенными компонентами, входящими в состав несмешивающихся с водой жидкостей и мигрирующими за пределами границы раздела фаз подобно обычным солевым загрязнителям. В таких ситуациях приходится рассматривать миграцию многофазных жидкостей [12, 19].

Описание миграции несмешивающихся с водой жидкостей (НВЖ) отличается целым рядом особенностей, обусловленных различиями в фазовых проницаемостях и плотностях, капиллярными эффектами, межфазовыми переходами отдельных компонентов и др. Наиболее характерными представителями НВЖ являются углеводородные соединения, которые могут отличаться от пластовых вод по плотности как в меньшую сторону – легкие углеводородные соединения, образующие на поверхности подземных вод скопления, миграция которых в значительной степени контролируется градиентами естественного фильтрационного потока, так и в большую – тяжелые углеводородные соединения, при поступлении которых в водоносный горизонт происходит их опускание к подошве горизонта, и процесс контролируется не только гидродинамикой фильтрационного потока, но и морфологией нижнего водоупорного основания [19].

В теории фильтрации под термином фаза понимается вещество однородное или неоднородное по химическому составу, находящееся в определенном физическом состоянии и занимающее определенный объем порового пространства. Пористая среда

может быть заполнена несколькими подвижными жидкими фазами и только одной газовой. В качестве жидких фаз мы рассматриваем воду и НВЖ. Одна жидкая фаза смачивает пористую среду больше, чем другая, и называется смачивающей, в рассматриваемом случае, это – вода. Другая, менее смачивающая жидкая фаза, называется несмачивающей, в данном случае это – НВЖ. Смачивающая фаза занимает меньшие пустоты в породе, в то время как несмачивающая занимает более крупные пустоты. Неподвижными являются твердые фазы – минеральный скелет или кристаллическая фаза как продукт агрегатного перехода жидкости в твердое состояние [10, 11, 19].

Каждая из фаз отделена от других границами раздела, существование которых обусловлено перераспределением сил притяжения между молекулами. В состав каждой из подвижных фаз, за исключением собственно НВЖ, могут входить компоненты-представители смежных фаз – ассоциаций индивидуальных химических элементов и соединений. Массообмен между фазами (растворение, дегазация, испарение, конденсация, адсорбция) может приводить к исчезновению одной из жидких фаз или появлению новой жидкой фазы. НВЖ может содержать несколько компонентов, потенциально растворимых в воде [19].

Введем понятия объемного насыщения породы по α -фазе (θ_α) и насыщенности породы по α -фазе (S_α), которые характеризуют состояние и параметрическую обусловленность многофазной системы:

$$\theta_\alpha = \frac{V_\alpha}{V}$$

где V_α – объем α -фазы, м³; V – объем всех фаз, включая твердую, м³ [19].

$$S_\alpha = \frac{V_\alpha}{Vn} = \frac{\theta_\alpha}{n}$$

где n – пористость [19].

Пусть в элементарном репрезентативном объеме пористой среды происходит совместное течение двух несмешивающихся жидкостей, каждая из которых занимает только часть порового пространства. Если обозначить насыщенность среды по каждой из фаз S_1 , и S_2 , то справедливо равенство [19]:

$$S_1 + S_2 = 1$$

Так как при известной насыщенности по одной из фаз может быть определена насыщенность среды по другой фазе [19].

При совместном течении двух или более жидкостей в пористой среде, каждая фаза движется под влиянием своего градиента внутрифазного давления, не мешая течению

соседней фазы. В общем виде математическая запись закона Дарси с учетом силы тяжести для многофазной изотермической фильтрации выглядит следующим образом:

$$v_{\alpha} = -\frac{K_{\alpha}}{\mu_{\alpha}}(\nabla P_{\alpha} - \rho_{\alpha}g)$$

где v_{α} – скорость фильтрации α -фазы, м/сут; ∇P_{α} – градиент фазового давления; K_{α} – фазовая проницаемость, м²; μ_{α} – динамическая вязкость α -фазы, кг/м·сут; ρ_{α} – плотность α -фазы, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/сут² [19, 36].

Данное уравнение описывает движение фаз под влиянием индивидуального градиента давления и гравитационных сил. Скорость фильтрации прямо пропорциональна фазовой проницаемости и обратно пропорциональна вязкости фазы [19].

Величина K_{α} зависит от свойств среды, определяемых ее абсолютной проницаемостью и насыщенностью α -фазы. Введем понятие относительной фазовой проницаемости ($K_{r\alpha}$):

$$K_{r\alpha}(S) = \frac{K_{\alpha}(S)}{K}$$

где K – абсолютная проницаемость среды, м²; $K_{r\alpha}$ – относительная фазовая проницаемость [11, 19].

Так, закон Дарси для многофазной фильтрации выглядит следующим образом [11, 19, 29]:

$$v_{\alpha} = -\frac{K}{\mu_{\alpha}}K_{r\alpha}(\nabla P_{\alpha} - \rho_{\alpha}g) \quad (1.1)$$

Параметр $K_{r\alpha}$ показывает во сколько раз проницаемость среды для данной фазы оказывается меньше ее абсолютного значения за счет того, что часть порового пространства занята другими фазами. Другими словами, $K_{r\alpha}$ отражает количественную потерю скорости α -фазы за счет того, что часть порового пространства занята другой фазой [19].

В гидродинамических построениях обычно пользуются эмпирическими зависимостями $K_{r\alpha} = K_{r\alpha}(S)$, полученными либо посредством прямых динамических экспериментов, в которых устанавливается связь потоков флюидов или газов в образцах пород с их насыщенностью, либо аналитических трансформаций капиллярных функций – зависимости капиллярного давления от насыщенности. Основываясь на «геометрических» моделях распределения пор по размерам, также можно предсказать поведение функций относительной проницаемости фаз [19].

Характерной особенностью зависимостей $K_{r\alpha}(S)$ является существование некоторых «критических» точек насыщенности, определяющих физическое состояние и

подвижность жидкостей и газов в пористой среде. Для каждой фазы существует минимальная, или остаточная, насыщенность, при которой эта фаза теряет подвижность [19].

Потеря подвижности фазы обусловлена потерей связности соответствующей жидкости в поровых каналах. Таким образом, значения остаточной насыщенности характеризуют состояние системы, при котором одна из жидкостей в пористой среде представлена образованиями каплеподобных частиц, гидравлически не связанными с частицами в соседних порах. Движение таких дискретных частиц, испытывающих в пористой среде влияние капиллярных сил, возможно только при градиентах давления, многократно превышающих реальные градиенты давления. Поэтому остаточная насыщенность может быть определена как величина насыщенности, слабо меняющаяся, или не меняющаяся вовсе при существенном увеличении капиллярного давления [19].

Основной физической особенностью миграции многофазных жидкостей является наличие разных систем давлений (P_α) в различных фазах и соответствующего капиллярного давления на границах раздела фаз ($P_{\text{кап}}$), обусловленного поверхностным натяжением, а свойства и поведение мигрантов решающим образом зависят от степени насыщенности среды (S_α) по каждой фазе [12].

Так на контакте НВЖ и воды действует поверхностное натяжение (σ). Вода обычно является в этой ситуации смачивающей фазой, а НВЖ – несмачивающей, поверхностное натяжение на их контакте ассоциируется с межфазовым давлением, которое называется капиллярным:

$$P_{\text{кап}} = P_{\text{н}} - P_{\text{в}} = \frac{2\sigma_{\text{нв}} \cos \theta}{r_{\text{к}}}$$

где $P_{\text{н}}$ и $P_{\text{в}}$ – давления в НВЖ и воде соответственно ($P_{\text{н}} > P_{\text{в}}$); $\sigma_{\text{нв}}$ – поверхностное натяжение на контакте НВЖ и воды, дин/см; θ – краевой угол смачивания; $r_{\text{к}}$ – радиус пор грунта, см [11, 38].

Таким образом, для внедрения в водонасыщенную пористую среду НВЖ должна преодолеть некоторое пороговое давление, которому эквивалента минимальная пьезометрическая высота:

$$h_{\text{min}} = h_{\text{н}} - h_{\text{в}} = \frac{2\sigma_{\text{нв}} \cos \theta}{\rho_{\text{в}} g r_{\text{к}}}$$

где

$$h_\alpha = \frac{P_\alpha}{\rho_{\text{в}} g}$$

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с² [11, 19, 36].

1.2. Особенности гидрогеохимической миграции легких нефтепродуктов

К нефтепродуктам обычно относят различные углеводородные фракции, получаемые из нефтей. Это товарные сырые нефти, прошедшие первичную подготовку на промысле, и продукты переработки нефти, используемые в различных видах хозяйственной деятельности: авиационные и автомобильные бензины, реактивные, тракторные, осветительные керосины, дизельные и котельные топлива, мазуты, растворители, смазочные масла, гудроны, нефтяные битумы и прочие нефтепродукты (парафин, нефтяной кокс, присадки, нефтяные кислоты и др.) [21].

Основные компоненты нефтепродуктов – углеводороды. Наряду с углеводородами в нефтепродуктах, как и в нефтях, содержатся соединения серы, азота и кислорода. Помимо этого, постоянными компонентами товарных нефтепродуктов являются различные добавки, улучшающие их эксплуатационные свойства (антидетонаторы, антиокислители, ингибиторы коррозии и др.). Обычно их вводят в не больших количествах, составляющих доли процента [21].

На миграцию техногенных потерь нефтепродуктов в водных средах, в геологической среде и в воздушных средах определяюще влияют физические и физико-химические свойства теряемых нефтепродуктов, прежде всего их плотность, вязкость, температура кипения, водорастворимость и сорбируемость породами. В свою очередь данные свойств нефтепродуктов определяются их конкретным компонентным составом [21].

Таким образом, для понимания и прогноза процесса миграции нефтепродуктов в геологической среде необходимо изучение химического состава нефтепродуктов, их физических и физико-химических свойств, форм нахождения в геологической среде, а также процессов межфазового обмена в системе: нефтепродукт – вода – газ – горная порода.

1.2.1. Химический состав легких нефтепродуктов

Нефтепродукты с плотностью меньше 1 г/см^3 относятся к легким, а с плотностью больше 1 г/см^3 – к тяжелым [21].

Так к основным товарным легким нефтепродуктам относятся: бензин (C_4 – C_{12} , температура перегонки $40 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$), керосин (C_{12} – C_{16} , температура перегонки $200 \div 300 \text{ }^\circ\text{C}$), дизельное топливо (C_{12} – C_{16} , температура перегонки $300 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$) и котельное топливо [21].

Основная часть состава данных веществ приходится на следующие углеводородные группы: алканы, циклоалканы, ароматические углеводороды,

подробное описание которых приводится ниже. Содержание данных углеводородов в основных видах легких нефтепродуктов приведено в таблице 1. 1.

Таблица 1. 1 – Содержание углеводородов в легких нефтепродуктах [21]

Нефтепродукт		Массовая доля углеводородных групп, %		
		Парафиновые и нафтеновые	Ароматические	Непредельные
Бензины	А-76	77,4	5,2	17,4
	Б-70	83,0	17,0	0,0
Керосины	ТС-1	58,7	16,2	0,7
	Т-5	23,3	18,9	0,6
Дизельные топлива	ДЛ	93,9	5,4	-
	З	82,4	16,8	-

Алканы – парафиновые углеводороды с общей формулой C_nH_{2n+2} имеют прямую (n-алканы) и разветвленную (изо-алканы) цепь. Растворимость в воде n-алканов $C_{12}-C_{36}$ охватывает интервал очень малых значений от 0,008 до 0,0018 мг/л. N-алканы с числом атомов в молекуле выше 12 находятся в воде при $t = 20-25\text{ }^\circ\text{C}$ не в виде отдельных молекул, а в виде агрегатов из нескольких молекул. Низшие нефтяные углеводороды до бутана ($n = 4$) – газы, входят в состав природного газа и растворены в нефти. Углеводороды с $n = 5-17$ – жидкости с характерным «бензиновым» запахом; высшие углеводороды ($n > 17$) – твердые вещества [21].

Циклоалканы – нафтеновые углеводороды с общей формулой C_nH_{2n} , насыщенные циклические углеводороды ряда циклопентана и циклогексана, а также более сложные полициклические соединения от 2 до 5 циклов в молекуле. Атомы водорода могут быть заменены алкильными группами $-CH_3$, $-C_2H_5$ и т.д. Нафтены входят в состав всех типов нефтей и присутствуют во всех нефтяных фракциях: в бензиновых и керосиновых фракциях обнаружено более 80 индивидуальных нафтенных соединений состава C_5-C_{12} [21].

Ароматические углеводороды – непредельные циклические соединения ряда бензола. Общая формула C_nH_{2n-m} , где $n \geq 6$, $m \geq 6$ – четное число. Атомы водорода в них могут быть замещены на алкильные группы (CH_3 и т.д.). Ароматические соединения обладают повышенной устойчивостью структуры и более инертны к химическому окислению, чем алканы. Хорошо растворимы в воде, так растворимость бензола составляет 1780 мг/л, толуола 515 мг/л [21].

1.2.2. Физические и физико-химические свойства легких нефтепродуктов

На миграцию нефтепродуктов в водных средах (поверхностные и подземные воды), в геологической среде (земная поверхность, почвы и грунты зоны аэрации, горизонты подземных вод) и в воздушных средах (порово-трещинное пространство почв и грунтов зоны аэрации, приземной слой собственно атмосферы) определяюще влияют физические и физико-химические свойств нефтепродуктов, прежде всего их плотность, вязкость, температура кипения, водорастворимость и сорбируемость породами. Первые три из перечисленных выше свойств нефтепродуктов определяются их конкретным компонентным составом [21].

В таблице 1. 2 приведены физические свойства основных легких нефтепродуктов.

Таблица 1. 2 – Физические свойства легких нефтепродуктов [21]

Нефтепродукт	Температура кипения, °С	Плотность при 20 °С, г/см ³	Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	Растворимость, мг/л
Бензины	30–210	0,70–0,75	0,43–0,82	9,0–505
Керосины	130–300	0,775–0,85	1,25–1,35	2,0–12,5
Топлива дизельные	150–400	0,795–0,88	1,84–7,73	-
Топлива котельные	-	0,9–0,93	35,3–87,5 (при 50 °С)	4,4–22

Рассмотрим вышеперечисленные свойства легких нефтепродуктов подробнее.

Плотность нефтепродукта определяется его массой, содержащейся в единице объема. Часто в литературе используют безразмерную величину «относительная плотность», которая выражает отношение массы какого-либо объема нефтепродукта при данной температуре к массе такого же объема воды с температурой 4 °С. Величина плотности зависит главным образом от молекулярного строения. Легкие нефтепродукты имеют плотность меньше единицы [21].

Вязкость нефтепродуктов – их свойство оказывать сопротивление перемещению под влиянием действующих на них сил. Вязкость зависит от молекулярной массы и строения, т.е. от фракционного и группового состава нефтепродукта: чем тяжелее фракционный состав, чем больше асфальтосмолистых веществ, тем выше вязкость. В целом вязкость легких нефтепродуктов больше вязкости воды, равной 1 мм²/с, но вязкость бензинов меньше вязкости воды. Это обстоятельство обуславливает

способность последних к более быстрому передвижению в пористой среде грунтов по сравнению с другими жидкими нефтепродуктами и с собственно водой [21].

Температура кипения является прямой функцией молекулярной массы, характеризует способность ряда компонентов из состава нефтепродуктов к улетучиванию. Так, например, бензины, имеющие в своем составе значительные количества углеводородов с низкой температурой кипения, могут сравнительно легко испаряться, к примеру, с поверхности загрязненных нефтепродуктами грунтовых вод, образуя в зоне аэрации газовые ореолы [21].

Водорастворимость нефтепродуктов связана прежде всего с их химическим составом. Она уменьшается со снижением содержания нефтепродуктах ароматических углеводородов и повышением концентраций циклопарафиновых и особенно парафиновых составляющих. То есть растворимость уменьшается в ряду: ароматические углеводороды > циклопарафины > парафины. Наибольшей растворимостью отличаются такие соединения как бензол (1600–1800 мг/л), толуол (500–600 мг/л), ксилол (170–200 мг/л) [21].

Сорбируемость породами – нефтяные вещества сорбируются горными породами и почвами главным образом в еще жидкой фазе. Преимущественно происходит сорбция полярных компонентов нефтяных веществ (нафтеновые кислоты, смолы, асфальтены) [21].

Чем более гидрофобен тот или иной компонент, тем сильнее он сорбируется. Наименее сорбируемыми оказываются относительно сильно растворимые углеводороды, например, бензол [11].

Таким образом, способность углеводородов к сорбированию породами увеличивается в последовательности: олефины – ароматические – циклопарафины – парафины [14].

1.2.3. Формы нахождения легких нефтепродуктов в геологической среде

В подземных условиях углеводороды могут находиться в следующих формах: самостоятельная, несмешивающаяся с водой жидкая фаза, находящаяся в подвижном состоянии или остаточном насыщении как в зоне аэрации, так и в зоне насыщения, в газовой фазе, в сорбированном состоянии, в растворенном и водно-эмульгированном состояниях в грунтовых водах и водах зоны аэрации [5].

Роль этих форм в общем балансе загрязнения для каждого конкретного участка может быть различной. При численном моделировании миграции органических соединений, их распределение между фазами обычно принимается равновесным [5].

Рассмотрим более подробно каждую из вышеперечисленных форм:

Не смешавшаяся с водой, самостоятельная, жидкая фаза – часть жидких нефтепродуктов, менее плотных, чем вода, которая скапливается на поверхности подземных вод и находится в исходном легкоподвижном жидкостном состоянии. Данная форма нахождения легких нефтепродуктов в геологической среде является первичной, все остальные формы легких нефтепродуктов в геологической среде являются его производными [21].

Газообразное состояние – это скапливание и последующее перемещение летучих углеводородов, перешедших из жидкой в газовую фазу при испарении с поверхностей подземных скоплений жидких нефтепродуктов, в пустотном пространстве грунтов, не занятом водой, или же в собственно воде, насыщающей данное пространство. Данное состояние весьма подвижно. Перемещение углеводородных газов в свободном от воды пустотном пространстве происходит под действием градиента давления, имеется в основном восходящее направление к земной поверхности, которое называется эффузией. Движение газообразных углеводородов в водных растворах происходит под действием градиента концентрации и называется диффузией. Следовательно, целесообразно различать свободное газообразное состояние нефтепродуктов с эффузионным движением газов и водорастворенное газообразное состояние нефтепродуктов с диффузионным движением газов. Практически более значимо «свободное» состояние [21].

Сорбированное состояние – совокупность связанных состояний нефтепродуктов: адсорбированное, абсорбированное и хемосорбированное. Это скапливание нефтепродуктов в почвах и грунтах в результате поглощения нефтепродуктовых веществ частицами данных почв и грунтов из нефтепродуктовых жидкостей и водных нефтепродуктовых растворов. При адсорбции происходит поверхностное поглощение, абсорбции – объемное, а хемосорбция характеризуется образованием химических соединений. Наибольшая склонность к переходу в сорбированные состояния отмечается у парафиновой группы углеводородных компонентов нефтепродуктов. Активно сорбируются почвами и грунтами полярные углеводородные соединения: нафтенновые кислоты, смолы и асфальтены. В почвенном слое процессы сорбции нефтепродуктовых веществ особенно интенсивно протекают в его гумусовой составляющей [21].

Водорастворенное состояние легких нефтепродуктов весьма подвижно, его можно охарактеризовать как скапливание и перемещение водорастворенных углеводородов и некоторых содержащихся и нефтепродуктах углеводородных ингредиентов в подземных водах и в питающих их сточных водах технологического и

атмосферного происхождения. В целом нефтепродуктовые смеси плохо растворяются в воде. Но это правило не распространяется на абсолютно все группы составляющих их углеводородных соединений. Оно не относится к ароматическим и, в меньшей степени, к циклопарафиновым углеводородам. Следовательно, чем выше их содержание в контактирующих с водой товарных видах нефтепродуктов, тем больше концентрация данных компонентов в подземных водах [21].

Водно-эмульгированное состояние нефтепродуктов, обычно сопутствующее водорастворенному, также очень подвижно. Оно представляет собой скапливание и перемещение в подземных и инфильтрующихся водах водонерастворенных, но водосмешанных в иной форме, частиц исходных углеводородных жидкостей. Как и водорастворение, другие формы водосмешения в целом нетипичны для нефтепродуктовых жидкостей. Но какая-то часть жидкостных нефтепродуктов в определенных условиях все же образует эмульгированную форму смешения [21].

1.2.4. Межфазный обмен и биodeградация легких нефтепродуктов

Масштабы загрязнения подземных пород и пород зоны аэрации несмешивающимися с водой жидкостями во многом определяются процессами обмена веществом между исходными продуктами в их составе, поровыми водами, газом и минеральным скелетом. К таким процессам относятся растворение, испарение и адсорбция. Для их описания чаще всего используется предпосылка о существовании локального равновесия на контакте фаз, обеспечивающего насыщение веществом нефтепродукта приграничного слоя жидкости или газа до предельного значения, которое отвечает концентрации максимальной растворимости компонента в данных условиях [19].

Растворение – после первичного поступления и распространения легких нефтепродуктов в виде НВЖ, дальнейшая их судьба во многом определяется процессом растворения. В частности, при насыщенности, равной остаточной или меньшей последней, именно эти процессы играют доминирующую роль в последующем распространении загрязнения на новые участки [11].

Весьма характерно, что концентрации легких нефтепродуктов, растворенных в подземных водах, практически никогда не достигают предельных величин растворимости и обычно не превышают 10% от них. Объясняется это конвективно-диффузионным перемешиванием в условиях реальных, неоднородных и гетерогенных горных пород. К тому же по мере выноса водой более растворимых соединений постепенно меняется и состав исходной НВЖ. Впрочем, в большинстве своем ПДК для нефтепродуктов и составляющих их углеводородов намного меньше их предельной

растворимости, так что реально наблюдаемые концентрации свидетельствуют о недопустимом загрязнении [11].

Переход вещества в растворенное состояние определяется по следующей формуле:

$$W_w = k_w a_s (C_{ws} - C_w)$$

где W_w – объемный массовый поток из несмешивающейся с водой жидкой фазы в водную фазу, кг/м³сут; k_w – коэффициент массопереноса через поверхность контакта НВЖ и воды, м/сут; a_s – удельная поверхность раздела между фазами, м²/м³; C_{ws} – равновесная концентрация вещества в водном растворе, принимается за растворимость нефтепродуктов, кг/м³; C_w – текущая концентрация нефтепродукта в водном растворе, кг/м³ [19, 21, 11].

Испарение легких нефтепродуктов играет важную роль, когда эти вещества приурочены к приповерхностной зоне и имеются условия для интенсивного движения воздуха и пара, породы характеризуются невысокой относительной влажностью, отмечается высокое давление пара и т. п. С другой стороны, данный процесс может целенаправленно управляться при осуществлении реабилитационных мер на участках загрязнения подземных вод, в процессе которых производится искусственное аэрирование подземной гидросферы, в том числе полностью водонасыщенных пород [11, 19].

Мигрируя в газовой фазе, компонент в конце концов конденсируется, сорбируется, разлагается или уходит в атмосферу [11].

Испаряемость компонента определяется, с одной стороны, закономерностью Генри, которая отражает распределение в смеси вода – воздух, а именно парциальное давление или концентрация компонента в газовой фазе связаны с его водной концентрацией через константу Генри следующей формулой:

$$p = HC$$

или

$$C_r = \frac{H}{RT} C$$

где p – парциальное давление; H – константа Генри, атм·м³/моль; C – концентрация компонента в водной фазе, моль/м³; C_r – концентрация компонента в газовой фазе, моль/м³; R – универсальная газовая постоянная, 8,2057·10⁻⁵ атм·м³/(моль·К); T – температура, К [11, 19].

С другой стороны, определяющими являются закономерности переноса газовой фазы, причем доминирует обычно диффузионная составляющая: коэффициент диффузии в породе, лишь частично заполненной водой, оказывается примерно на 4

порядка выше, чем для жидкой фазы. Однако существенную роль может играть и конвекция в зоне аэрации, обусловленная высоким давлением газа или его плотностным градиентом [11, 19].

Последний фактор становится заметным для слабосорбируемых в газообразном состоянии углеводородов при увеличении плотности естественной газовой компоненты более чем на 10% и при проницаемости, превышающей 10^{-11} м². Плотный газ, образовавшийся при испарении легких нефтепродуктов в зоне аэрации, погружается к зеркалу грунтовых вод и смешивается здесь с газом, испарившемся из насыщенной зоны, где интенсивность испарения тем больше, чем больше давление насыщенного пара. В этом же направлении мигрирует по зоне аэрации та часть паров углеводородов, которая, смешиваясь с внутрипоровым воздухом, выделяется на водной фазе, а затем движется вниз с инфильтрующейся водой. При этом равновесному распределению фаз отвечает скорость вертикальной миграции углеводородов с коэффициентом задержки (относительно скорости инфильтрации воды, без учета сорбции):

$$R_r = 1 + \frac{n_b}{n_r} \frac{1}{\bar{H}}$$

где R_r – коэффициент задержки для газовой фазы; n_b и n_r – пористость, отвечающая соответственно заполнение водой и газом; \bar{H} – безразмерная константа Генри [11, 19].

Сорбция органических соединений может происходить как из раствора, так и из газовой фазы. Явления «связывания» породой исходных жидких нефтепродуктов в процессе их фильтрационного переноса в большей степени обусловлены капиллярными эффектами, поэтому сорбцией самостоятельной фазы нефтепродуктов можно пренебречь [5, 19].

Для описания сорбции растворенного органического вещества используется следующая формула:

$$C_s = \rho_b K_d C_w$$

где C_s – концентрация нефтепродуктов на минеральном скелете, кг/м³; ρ_b – объемная плотность породы, кг/м³; K_d – коэффициент равновесного сорбционного распределения, м³/кг; C_w – концентрация растворенного нефтепродукта в водной фазе, кг/м³ [19, 21].

Продукты растворения нефтепродуктов, относящиеся в своем большинстве к гидрофобным органическим соединениям, практически не сорбируются минеральной фазой. Однако наблюдается линейная зависимость K_d от содержания в породе органического углерода. Таким образом, K_d можно выразить как функцию от содержания природного органического углерода и коэффициента сорбционного распределения растворенного нефтепродукта на этом веществе:

$$K_d = f_{oc}K_{oc} \quad (1.2)$$

где f_{oc} – исходное относительное содержание органического вещества в породе, обычно измеряется в миллиграммах органического углерода, отнесенного к миллиграмм незагрязненной породы; K_{oc} – коэффициент сорбционного распределения на органическом углероде, см³/г [19, 21].

Более активно сорбция протекает в ненасыщенной зоне. Здесь в первую очередь происходит сорбция летучих углеводородов из газовой фазы, пары которых могут усваиваться в процессе их диффузии через породы зоны аэрации до достижения концентрационного равновесия с жидкой фазой. Соответственно значение коэффициента задержки для газовой фазы возрастает за счет сорбции до величины:

$$R_r = 1 + \frac{n_v}{n_r} \frac{1}{H} + \frac{\rho_c K_d}{n_r H}$$

Биодеградация играет важную роль в трансформации легких нефтепродуктов, которая в первую очередь идет через растворимую их фазу, а также и сорбированную на минеральном скелете. Поступление углеводородов в подземные воды стимулирует жизнедеятельность бактерий, использующих углеводороды в качестве питательной органики, если таковая отсутствует в естественных условиях. В этом смысле биодеградация дополняет сорбцию нефтепродуктов, которая, наоборот, протекает наиболее интенсивно при наличии естественной органики на твердой фазе и к тому же нередко обратима [11, 31].

Для биодеградации необходимо наличие в среде электронных акцепторов. В аэробных условиях таковым является прежде всего кислород в растворенной форме. Поэтому кинетика процесса биодеградации на микроуровне играет относительно малую роль, и его интенсивность часто решающим образом зависит от наличия кислорода (так как его растворимость невелика – лишь 8–15 мг/л), а также от скорости его поступления с фильтрационным потоком (конвективно-дисперсионный перенос) или из ненасыщенной зоны (диффузия воздуха) [11].

Если подвод кислорода в водоносную структуру ограничен, то по мере его использования на биодеградацию мигрирующих углеводородов среда из аэробной может превратиться в анаэробную. В таком варианте роль электронного акцептора могут принять на себя нитратные и сульфатные соединения кислорода: в процессах денитрификации и десульфатизации углеводороды используются как источник углерода, если содержание последнего на твердой фазе недостаточно велико. В целом биодеградация нефтепродуктов оказывается обычно гораздо более интенсивной, чем их небиологическая деградация [11, 31].

Для оценки интенсивности процесса биodeградации растворенных в воде нефтепродуктов применяется следующая экспоненциальная зависимость:

$$G = G_0 \exp - (0.697t/\tau)$$

где G – содержание вещества в момент времени t ; G_0 – начальное содержание вещества; τ – время полураспада вещества за счет биodeградации, причем $\tau \sim \sqrt{K_{oc}}$ [7, 19].

Из этого соотношения можно оценить время, за которое концентрация загрязняющего вещества достигнет предельно допустимой:

$$t^* = 1.43\tau \ln(C_0/C^*)$$

где t^* – время достижения предельно допустимой концентрации нефтепродукта; C_0 – начальная концентрация нефтепродукта, принимаемая за его растворимость в воде; C^* – предельно допустимая концентрация нефтепродукта в воде [7].

Так на основе вышеизложенных формул в таблице 1.3 приводятся характерные значения времени полураспада для основных компонентов бензина и время распада до ПДК.

Таблица 1.3 – Время полураспада и достижения ПДК за счет биodeградации [7]

Вещество	Время полураспада τ , сут	Время достижения ПДК t^* , лет
Бензол	120	11,6
Толуол	39	3,5
Ксилол	11	9,5
Этилбензол	6	8,7

Исходя из данных таблицы, становится очевидным, что время достижения ПДК для компонентов бензина велико и исчисляется годами.

До сих пор не существует общепринятого мнения о возможности полного самоочищения геологической среды от загрязнения нефтепродуктами за счет биodeградации. Так, в работе [28] описан полевой эксперимент по введению в незагрязненный песчаный водоносный горизонт ароматических углеводородов, входящих в состав бензина, в концентрации 7,6 мг/л. Через 434 суток внесенные в водоносный горизонт углеводороды претерпели полное разложение посредством биodeградации.

Однако, по данным работы [31], на протяжении 100 лет аэробную деградацию испытают лишь 4% массы нефтепродуктов, которые находятся в грунте. Тем не менее с помощью искусственного введения бактерий в зону нефтепродуктового загрязнения и

усилении притока кислорода можно произвести реабилитацию загрязненной геологической среды [14, 31].

В данной работе автор придерживается мнения о том, что легкие нефтепродукты, растворенные в воде сильно подвержены биологическому разложению, что играет большую роль в самоочищении геологической среды, при этом время распада легких нефтепродуктов принимается равным значениям, приведенным в таблице 1. 3.

1.2.5. Миграция самостоятельной и растворенной фазы легких нефтепродуктов

При миграции легких нефтепродуктов в геологической среде можно выделить зону загрязнения, которая содержит нефтепродукт в виде НВЖ, а также зону, в которой имеются только растворенные компоненты нефтепродуктов.

Рассмотрим подробнее поведение в геологической среде легких нефтепродуктов в самостоятельной и растворенной фазах.

Миграция нефтепродуктов в самостоятельной фазе в виде НВЖ как в зоне аэрации, так и в насыщенной зоне определяется законами многофазной фильтрации, которые подробно были описаны в главе 1.1.3 настоящей работы.

Прежде чем жидкие нефтепродукты оказываются на поверхности подземных вод, происходит их субвертикальная миграция в ненасыщенных породах, которые в ряде случаев являются хорошим буфером, сдерживающим загрязнение и снижающим отрицательные последствия разливов нефтепродуктов [19, 37].

Таким образом все случаи загрязнения геологической среды можно разделить на два вида:

1. Количество инфильтрующегося нефтепродукта слишком мало, чтобы преодолеть капиллярное давление для внедрения в водонасыщенную пористую среду. В таком случае весь объем жидкого нефтепродукта сохраняется в зоне аэрации и не распространяется в зону насыщения. Однако, просачивающиеся инфильтрационные воды растворяют нефтепродукт и переносят растворенные компоненты в подземные воды, в дальнейшем распространяясь с ними. Подобная ситуация отражена на рисунке 1.1 [37].
2. Инфильтрационное количество нефтепродукта достаточное для преодоления капиллярного давления. В таком случае нефтепродукт в виде самостоятельной фазы достигнет насыщенной зоны и будет распространяться в ней, кроме того инфильтрационные воды и воды насыщенной зоны будут растворять и распространять компоненты жидкого нефтепродукта. Подобная ситуация отражена на рисунке 1.2 [37].

При достижении загрязнением грунтовых водоносных горизонтов самостоятельная фаза легких нефтепродуктов может образовывать плавающие на поверхности подземных вод скопления – линзы, миграция которых контролируется градиентами естественного фильтрационного потока [19].

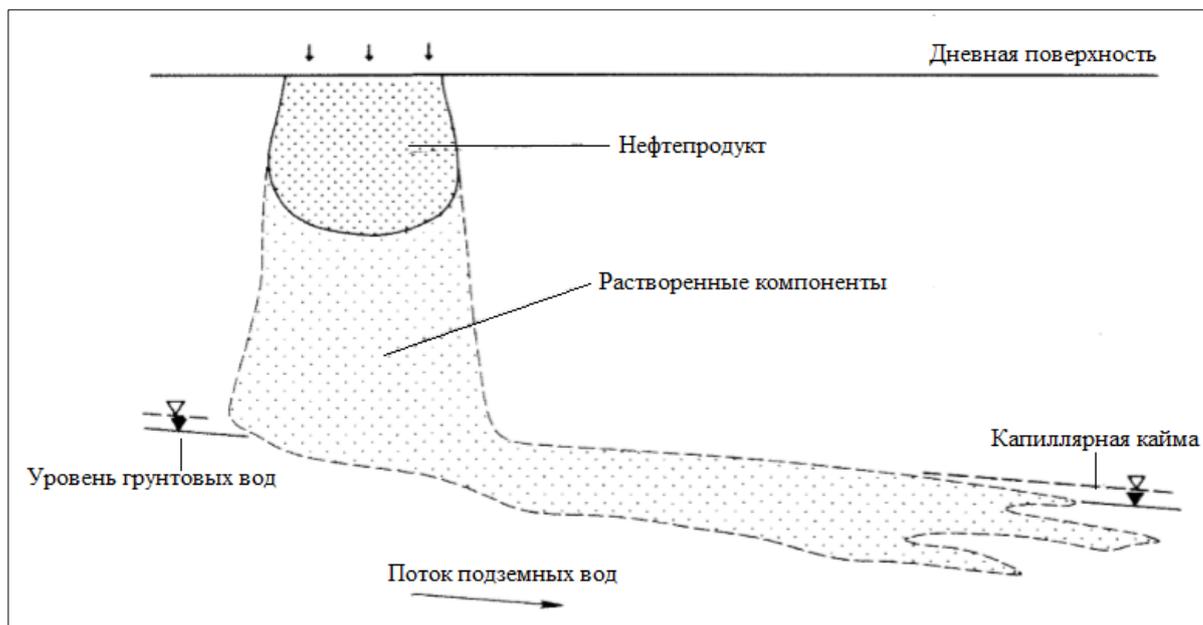


Рисунок 1.1. Аккумулированные в зоне аэрации нефтепродукты и их растворенные компоненты [37]

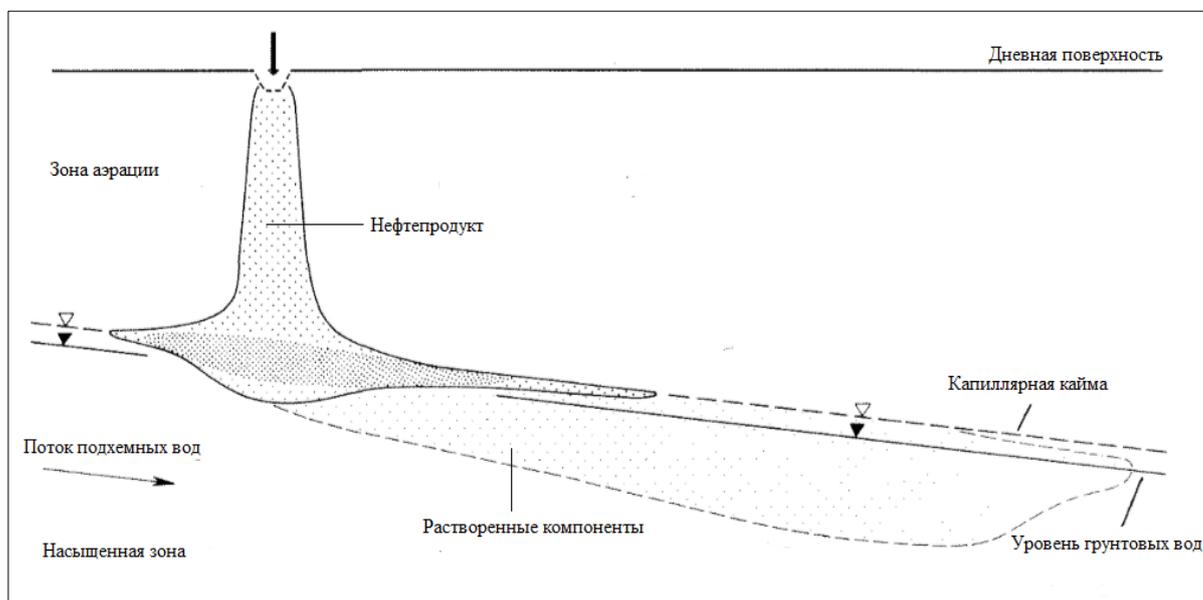


Рисунок 1.2. Распространение жидкого нефтепродукта и его растворенных компонентов [37]

Миграция растворенного состояния нефтепродуктов. Загрязнение подземных вод растворенными нефтепродуктами является наиболее опасным и трудноустраняемым. Это утверждение объясняется тем, что растворенные компоненты нефтепродуктов встречаются при любых объемах нефтепродуктового загрязнения. Даже после откачки

жидких скоплений нефтепродуктов их остаточная насыщенность обеспечивает длительное загрязнение подземных вод растворенными углеводородами. Кроме того, ПДК большинства легких нефтепродуктов и их компонентов меньше их растворимости на два порядка и более, поэтому изучение и прогноз миграции растворенных нефтепродуктов при любых объемах загрязнения нефтепродуктами геологической среды является наиболее важным [11, 14].

Вследствие вышесказанного, в данной работе преимущественное значение отдается рассмотрению миграции именно растворенных нефтепродуктов.

Миграция растворенного состояния нефтепродуктов определяется законами гидродинамической дисперсии, которые также были описаны в главе 1.1.3 настоящей работы.

1.3. Биологическое действие легких нефтепродуктов

Легкие нефтепродукты являются наиболее токсичной для живых организмов группой среди других нефтепродуктов. Токсическое действие нефтепродуктов возрастает с увеличением содержания в них ароматических углеводородов, которые являются наиболее токсичными компонентами нефтепродуктов. Токсический эффект при отравлении легкими нефтепродуктами наступает быстрее, чем при отравлении тяжелой группой, но действует на протяжении более короткого срока, так как легкие нефтепродукты в грунтах наименее стойкие [9, 21].

На организм человека некоторые углеводороды, входящие в состав легких нефтепродуктов, воздействуют следующим образом: бензол – обладает сильным воздействием на нервную систему, растворяет нервные клетки, разрушает печень и почки; толуол – раздражает глаза и кожу, при сильном отравлении разрушает печень и кости; ксилолы – при постоянном вдыхании возможно нарушение координации движений, раздражение дыхательных путей. ПДК для суммы нефтепродуктов в питьевой воде составляет 0,1 мг/л [20, 21].

Попадая в водные объекты, нефтепродукты распространяются по всей толще воды и накапливаются в донных отложениях, тем самым действуя на все группы организмов, обитающих как в поверхностном слое, так и в толще воды и грунте.

При хроническом загрязнении водоемов и водотоков углеводороды накапливаются в донных отложениях даже в том случае, если концентрация нефтепродуктов в воде не превышает предельно допустимых. Накопление нефтепродуктов в донных отложениях происходит на участках, где более активно протекают процессы илонакопления. Размыв

загрязненных донных отложений вызывает вторичное загрязнение вод и их дальнейший перенос в водном объекте [3].

Взаимодействие с нефтяными углеводородами приводит к различным физиолого-биохимическим и морфологическим изменениям в гидробионтах. В некоторых случаях подобные изменения носят необратимый характер, вызывают стойкие патологические нарушения, ведущие к гибели. Воздействуя на генетический аппарат, токсикант может стать причиной появления неполноценного потомства, а следовательно, вырождения вида. Выпадение тех или иных видов из сложившегося сообщества ведет к перестройке биоценозов, а при длительном или массовом воздействии токсиканта – к полному уничтожению экосистемы [13].

Кроме прямого токсического действия на рыб, поступающие в водоем нефтепродукты уничтожают нерестилища и их кормовую базу, что вызывает резкое сокращение численности рыб. Также нефтепродукты в водной среде препятствуют естественной аэрации и нарушают нормальные биологические процессы водоема. Водоемы, загрязненные нефтепродуктами, могут лишиться рыбохозяйственной ценности на долгое время [9, 24].

Наибольшую опасность для гидробионтов представляют растворенные в воде нефтепродукты, чем те, которые находятся на поверхности воды в самостоятельной фазе в виде пленки. Это утверждение объясняется двумя аспектами. Во-первых, поверхность тела рыб, ротовое отверстие, жаберные лепестки покрыты слизью, которая препятствует проникновению нефтепродукта в самостоятельном виде в организм. Рыба, помещенная в мазут, а затем в чистую воду, через минуту полностью освобождается от него. Однако растворенные в воде компоненты нефтепродуктов неизбежно поступают в организм рыбы при заглатывании загрязненной воды. При этом растворенные нефтепродукты накапливаются в организме рыбы. Во-вторых, наиболее токсичные компоненты нефтепродуктов, такие как ароматические углеводороды, имеют высокую растворимость в воде и легче всего переходят в водный раствор, в то время как в пленке на поверхности воды, образованной нефтепродуктами, остаются менее токсичные вещества [23, 24].

В первую очередь от повышенных концентраций растворенных нефтепродуктов страдают планктонные ракообразные и рыбы на ранних стадиях онтогенеза: развивающаяся икра, личинки и молодь рыб. Более устойчивыми к неблагоприятному воздействию являются взрослые особи рыб [24].

Нефтепродукты обладают средней токсичностью и относятся к третьему классу опасности. ПДК нефтепродуктов в растворенном и эмульгированном состоянии в водах водных объектов рыбохозяйственного значения составляет 0,05 мг/л. [16].

Приведем некоторые лабораторные значения летальных порогов и медианальных летальных доз (ЛД₅₀) некоторых нефтепродуктов в растворенном состоянии для разных видов гидробионтов:

1. ЛД₅₀ растворенного в воде бензина (48 часов воздействия) составляет: для планктонных организмов, таких как дафнии 10–50 мг/л; для личинок радужной форели 5–10 мг/л [24].
2. Летальный порог растворенного в воде бензина для взрослых особей радужной форели составляет 60–180 мг/л [23].
3. ЛД₅₀ растворенного в воде керосина (96 часов воздействия) составляет: для дафний 2 мг/л; для молоди некоторых видов дальневосточных рыб 0,5–1,1 мг/л [35, 22].
4. В общем случае, обобщенные летальные пороги суммы растворенных в воде нефтепродуктов следующие: для планктонных организмов, на примере дафний составляет 0,1 мг/л; для бентосных организмов на примере личинок хирономид – 1,4 мг/л; для личинок рыб 1,2 мг/л; для взрослых особей рыб 16 мг/л [9].

Однако, стоит отметить, что летальные концентрации в природных условиях имеют более низкие значения, чем полученные в ходе лабораторных экспериментов [22].

2. Описание объекта исследования

2.1. Физико-географические условия

Исследуемая территория располагается на юго-востоке Азиатской части России, в слабо освоенном районе Хабаровского края. Освоение данной территории связано с разработкой золоторудного месторождения «Золотинка». На рисунке 2.1. представлена схема изучаемой территории.

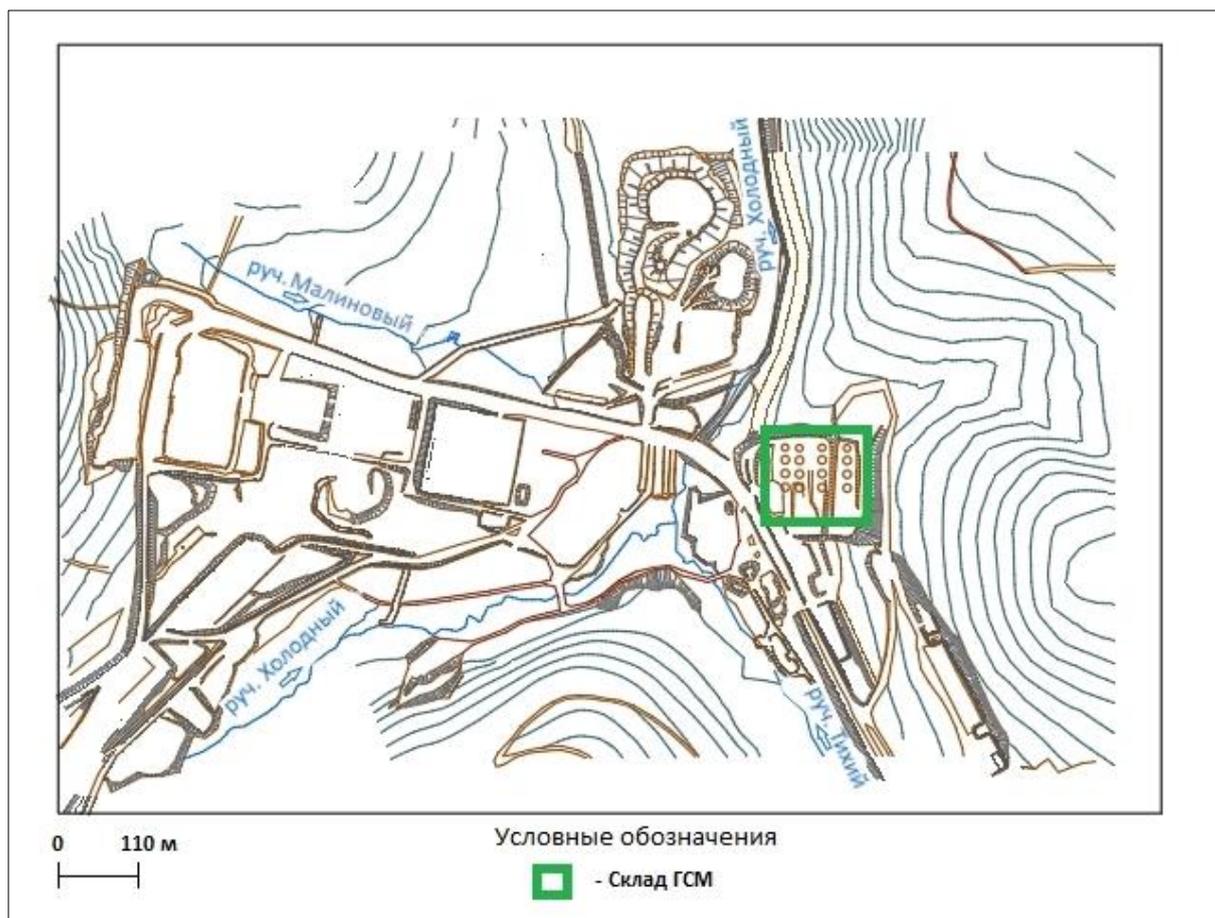


Рисунок 2.1. Схема территории исследования [42]

Территория исследования имеет размеры 1717 на 1206 м, в ее пределах расположены объекты склада ГСМ. Кроме того, в пределах исследуемой области протекает ручей Холодный, более подробная характеристика которого приводится в гидрологическом описании территории исследования.

2.1.1. Орография

Исследуемая территория расположена в отрогах хребта Безымянный. Абсолютные отметки поверхности изменяются в пределах от 270 до 420 м, наименьшие абсолютные отметки территории зафиксированы вдоль уреза воды ручья Холодный, в то время как

наивысшие абсолютные отметки отмечены в юго-восточной части описываемой территории [42].

Площадка размещения объектов склада ГСМ находится у подошвы склона юго-западной экспозиции, крутизна которого варьирует в пределах 6–9° [42].

2.1.2. Климат

Устойчивый переход средних суточных температур воздуха через 0 °С происходит здесь 18 апреля и 13 октября. Период со средними положительными температурами воздуха составляет 177 дней, с отрицательными – 188. Средняя многолетняя температура воздуха равна минус 3,6 °С. Наиболее холодным месяцем в году является январь, средняя температура воздуха которого равна минус 28,7 °С. Абсолютный минимум температуры воздуха составляет минус 56 °С. Самый тёплый месяц года – июль, его средняя температура воздуха 18,1 °С, абсолютный максимум температуры воздуха составляет 39 °С. Средняя дата первого заморозка – 31 августа, средняя дата последнего заморозка – 19 июня. Средняя продолжительность безморозного периода – 72 дня [42].

Среднегодовое количество осадков составляет 721 мм. Среднесуточное количество осадков – 5 мм. Средний суточный максимум осадков составляет 41 мм, абсолютный максимум – 102 мм [42].

Территория находится вне зоны распространения многолетней мерзлоты [42].

Таким образом, по климатическому районированию изучаемая территория относится к подрайону 1А северной строительно-климатической зоны (в соответствии с СП 131.13330.2012) [42].

2.1.3. Гидрология

В пределах исследуемой территории протекает ручей Холодный, пересекая исследуемую область в ее юго-западной, центральной и северной частях, как показано на рисунке 2.1. На юге исследуемой территории в ручей Холодный впадает ручей Тихий, а на северо-востоке – ручей Малиновый, гидрологические характеристики которых в данной работе рассматриваться не будут.

По данным государственного водного реестра, ручей Холодный является притоком реки Белая, принадлежащей бассейну реки Амгунь, которая в свою очередь является левым притоком реки Амур.

Ручей Холодный является постоянно действующим водотоком. Питание данного ручья как дождевое и снеговое, так и подземное. Среднегодовое значения расхода воды данного ручья составляет 35,7 м³/с [42].

По данным ОВОС, проведенном на исследуемой территории, в водах ручья Холодный, а также впадающих в него ручьев Тихий и Малиновый, содержания нефти и нефтепродуктов не обнаружено [42].

По данным государственного рыбохозяйственного реестра, ручей Холодный является водным объектом рыбохозяйственного значения первой категории.

2.1.4. Гидробиологическая характеристика

Река Белая является действующим ихтиологическим памятником природы.

В водах бассейна данной реки, а, следовательно, и водах ручья Холодный, постоянно обитают следующие пресноводные виды рыб: ленок острорылый (*Brachymystax lenok*), амурская щука (*Esox reichertii Dybowski*), таймень обыкновенный (*Hucho taimen*), хариус сибирский (*Thymallus arcticus*) [1].

А также заходят на нерест проходные лососевые виды рыб, такие как: кета (*Oncorhynchus keta*), горбуша (*Oncorhynchus gorbuscha*), сима (*Oncorhynchus masou*), этот вид занесен в Красную книгу Хабаровского края [1, 6].

Кроме того, в бассейне реки Белая обитают такие водоплавающие и околоводные птицы как: аистообразные – большая выпь (*Botaurus stellaris*) и черный аист (*Ciconia nigra*); гусеобразные – мандаринка (*Aix galericulata*) и чешуйчатый крохаль (*Mergus squamatus Gould*); соколообразные – скопа (*Pandion haliaetus*). Все перечисленные виды птиц занесены в Красную книгу Хабаровского края [6].

2.2. Геологическое строение

В геолого-литологическом строении изучаемой территории до глубины 10–12 м принимают участие следующие образования: скальные осадочные породы юрского возраста, элювиальные образования зоны выветривания осадочных пород юрского возраста, делювиальные отложения четвертичного возраста, современные аллювиальные отложения и техногенные отложения. На рисунках 2.2 и 2.3 отражено геологическое строение территории с помощью литологической колонки одной из скважин, пройденных на изучаемой местности.

Скальные осадочные породы юрского возраста (J₁₋₂) залегают под элювиальными образованиями. На территории размещения объектов склада ГСМ скальные породы представлены флишевой толщей крутопадающих слоев песчаника и маломощных прослоев алевролитов. Песчаники светло-серые мелкозернистые трещиноватые. Алевролиты зеленовато-серые и темно-серые. На площадке объектов склада ГСМ породы имеют северо-восточное простирание. На правобережье ручья

Холодный направление падения пластов на СЗ, угол падения 60–80°. Вскрытая вертикальная мощность скальных пород на площадке изменяется от 4 до 10,8 м [42].

Элювиальные образования зоны выветривания юрских песчаников и алевролитов (e J1-2) представлены дресвой и щебнем с супесчаным заполнителем до 40%, реже – с супесчаным и суглинистым заполнителем серого, желтовато-коричневого цвета до 30–45%. Элювиальные развиты на изучаемой территории повсеместно, они покрывают юрскую флишевую толщу. Вскрытая мощность элювия изменяется от 1,3 до 4,2 м [42].

Делювиальные отложения четвертичного возраста (d Q) распространены повсеместно с поверхности площадки, перекрывают толщу элювиальных образований. По литологическому составу делювий представлен в основном щебенистым грунтом с супесчаным и суглинистым твердым заполнителем, иногда у подошвы склона встречаются включения глыб. Мощность делювия изменяется от 1,5 до 3 м [42].

Современные аллювиальные отложения (al Qн) наблюдаются вдоль распространения ручья Холодный, представлены галечниками с песчано-гравийным заполнителем, песком. Мощность данных отложений варьирует от 3 до 5 м [42].

Техногенные отложения (t Qн) распространены на небольшой площади только в юго-западной части территории. По составу – это суглинки с включениями щебня и дресвы. Мощность насыпи составляет 2,0 - 2,5 м [42].

Геологический индекс		Абс. отметка подошвы слоя, м		Глубина подошвы слоя, м		Мощность слоя, м		Номер ИГЭ	Литологический разрез	Описание грунтов	Уровни грунтовых вод		Глубина отбора проб
появл. воды	установ. уровень												
dQ	288,13	0,30	0,30	8		Почвенно-растительный слой	Щебенистый грунт серо-коричневый с супесчаным и суглинистым заполнителем	3,20 20.04.08	21.04.08	1,50	3,00		
	286,63	1,80	1,50										
eJ1-2	284,83	3,60	1,80	11		Дресвяный грунт серо-коричневый с супесчаным заполнителем до 40%	3,20 20.04.08						
J1-2	282,43	6,00	2,40	12		Песчаники темно-серый мелкозернистые, прочные, трещиноватые							

Рисунок 2. 2. Геолого-литологическая колонка скважины, пробуренной в пределах исследуемой территории [42]

2.3. Гидрогеологические условия

Гидрогеологические условия изучаемой территории характеризуются развитием подземных вод типа верховодки и грунтовых вод порово-трещинного типа. Гидрогеологические условия территории отражены на рисунках 2. 2 и 2. 3, на которых изображены геолого-литологические колонки скважин, пройденных на изучаемой территории [42].

Абс. отметка устья: 300,67 м				Масштаб: 1:100					
Геологический индекс	Абс. отметка подошвы слоя, м	Глубина подошвы слоя, м	Мощность слоя, м	Номер ИГЭ	Литологический разрез	Описание грунтов	Уровни грунтовых вод		Глубина отбора проб
							поверх. воды	установ. уровень	
dQ	300,47	0,20	0,20	8		Щебенистый грунт серо-коричневый с суглинистым заполнителем до 40%	▽ 2,10 19,04,08	▽ 1,60 19,04,08	■ 3,00
	298,37	2,30	2,10						
eJ1-2	296,57	4,10	1,80	11		Элювий песчаников - серо-коричневый дресвяный грунт с супесчаным заполнителем до 40%	▽ 2,10 19,04,08		■ 3,00
J1-2	293,97	6,70	2,60	13		Песчаники серые мелкозернистые, средней прочности, трещиноватые	▽ 2,10 19,04,08		■ 6,00
	292,67	8,00	1,30	13		Алевролиты темно-серые средней прочности, трещиноватые, по трещинам развит суглинки			■ 7,00

Рисунок 2. 3. Геолого-литологическая колонка скважины, пробуренной в пределах исследуемой территории [42]

Подземные воды типа верховодки характеризуются эпизодическим распространением и циркулируют в толще щебенистых делювиальных отложений четвертичного возраста (d Q) в летнее время. Уровень воды фиксируется на глубине 0,4–1,5 м. Подземный поток направлен в соответствии с общим уклоном местности – к ручью Холодный. Коэффициент фильтрации водовмещающих пород равен 0,25 м/сут [42].

Грунтовые воды циркулируют в щебенистых и дресвяных элювиальных образованиях зоны выветривания юрских песчаников и алевролитов (e J₁₋₂). Уровни грунтовых вод зафиксированы на глубине 1,5–4,4 м. Движение подземных вод данного горизонта наблюдается в сторону ручья Холодный, куда происходит их разгрузка. Характерным источником питания подземных вод являются атмосферные осадки. Инфильтрационное питание составляет около 108 мм/год. Данный водоносный горизонт

можно охарактеризовать как напорно-безнапорный. Так в восточной части территории воды данного водоносного горизонта обладают местным напором, высота которого достигает 1,5–2,1 м. Горизонт грунтовых вод подстилается относительным водоупром, который представлен скальными флишевыми образованиями (J₁₋₂). Коэффициент фильтрации водовмещающих пород >10 м/сут. Грунтовые воды сульфатно-гидрокарбонатные натриевые. По данным проведенных химических анализов грунтовых вод, нефть и нефтепродукты в подземных водах описываемой территории отсутствуют [42].

3. Методика исследования

В текущей главе описаны методы исследования, с помощью которых решаются основные задачи данной работы. Для детального описания методов, исследование можно разделить на следующие основные части:

1. **Геофильтрационное моделирование.** Численное моделирование фильтрации подземных вод объекта исследования выполнялось на основе изученных материалов о геологических, гидрогеологических и гидрологических условий территории. Результатом геофильтрационного моделирования является матрица распределения напоров подземных вод, на основе которого рассчитывается матрица скоростей фильтрации, являющаяся базой при решении миграционных задач.
2. **Геомиграционное моделирование.** С помощью численного компьютерного моделирования осуществлялся прогноз миграции растворенных нефтепродуктов и оценка ареалов распространения потенциального загрязнения, в случае наступления внештатной ситуации. Моделирование миграции растворенных легких нефтепродуктов осуществлялось на базе построенной геофильтрационной модели, для которой задаются параметры конвективного и гидродисперсионного переноса загрязняющих веществ, схематизируются химические реакции. Осуществлялось моделирование двух возможных внештатных ситуаций, которые различаются временем воздействия и площадью распространения источника загрязнения.
3. **Расчет миграции линзы легких нефтепродуктов.** При утечках достаточного объема легких нефтепродуктов возможно образование линзоподобных скоплений на поверхности грунтовых вод, которые способны мигрировать в подземной гидросфере в виде самостоятельной, несмешивающейся с водой, фазы. Поэтому в рамках упрощенных аналитических решений, с помощью уравнений, описывающих многофазную фильтрацию, была рассчитана инфильтрация нефтепродуктов через зону аэрации, разлившихся на поверхности, и их миграция по поверхности грунтовых вод в виде линзы.
4. **Оценка экологического ущерба.** На основе оценки ареалов распространения потенциального загрязнения легкими нефтепродуктами в растворенном состоянии в случае наступления внештатной ситуации, производится оценка экологического ущерба.

Проведенное исследование позволяет разработать наиболее оптимальные методы защиты и реабилитации геологической среды, загрязненной легкими нефтепродуктами в случае наступления внештатной ситуации.

3.1. Геофильтрационное моделирование

Модель фильтрации подземных вод изучаемой территории строилась в компьютерной программе Visual Modflow Classic 2011. 1, с помощью программного модуля MODFLOW.

Данный программный модуль реализует численную конечно-разностную модель фильтрации подземных вод для расчета пространственно-временного распределения напоров в трехмерной постановке и базируется на уравнении неразрывности фильтрационного потока флюидов постоянной плотности. Программа предназначена для моделирования гидрогеологических задач в одномерной, двумерной и трехмерной постановках в условиях установившегося и неустойчивого режимов фильтрации. В программе реализуются как напорные, так и безнапорные условия фильтрации, а также сочетание этих условий. Программа может быть использована для решения широкого круга гидрогеологических задач, связанных с проблемами водоснабжения, осушения месторождений полезных ископаемых, истощения и искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод [12].

Трехмерное движение подземных вод постоянной плотности в насыщенной пористой среде описывается следующим дифференциальным уравнением, которое является основным при решении гидрогеологических задач в MODFLOW:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

где x, y, z – координаты, м; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} – коэффициенты фильтрации по координатным осям x, y, z , м/сут; W – объемный поток на единицу объема, характеризует источники и/или стоки воды, сут⁻¹; S_s – упругая емкость породы, м⁻¹; h – гидравлический напор, м; t – время, сут [34].

В настоящей работе геофильтрационная модель строилась в условиях стационарного режима фильтрации.

3.1.1. Схематизация природных условий

Для построения модели фильтрации подземных вод исследуемой территории необходимо схематизировать природные условия объекта, а именно выбрать наиболее оптимальную область для моделирования, создать сетку модели, схематизировать геологическое строение и гидрогеологические условия моделируемой территории, установить граничные условия.

В данном разделе описан каждый шаг схематизации природных условий при построении геофильтрационной модели.

Сетка модели. При решении уравнения движения подземных вод в MODFLOW используется блок-центрированный конечно-разностный подход, при котором область фильтрации дискретизируется на строки, столбцы и слои. Таким образом, модель обретает сеточное строение, образованное прямоугольными блоками пористой среды, называемые ячейками. Для каждой ячейки модели задаются собственные фильтрационные и емкостные параметры, а для центра каждой ячейки, который называется узлом, рассчитываются значения напоров. Схема блок-центрированной сетки представлена на рисунке 3. 1 [34].

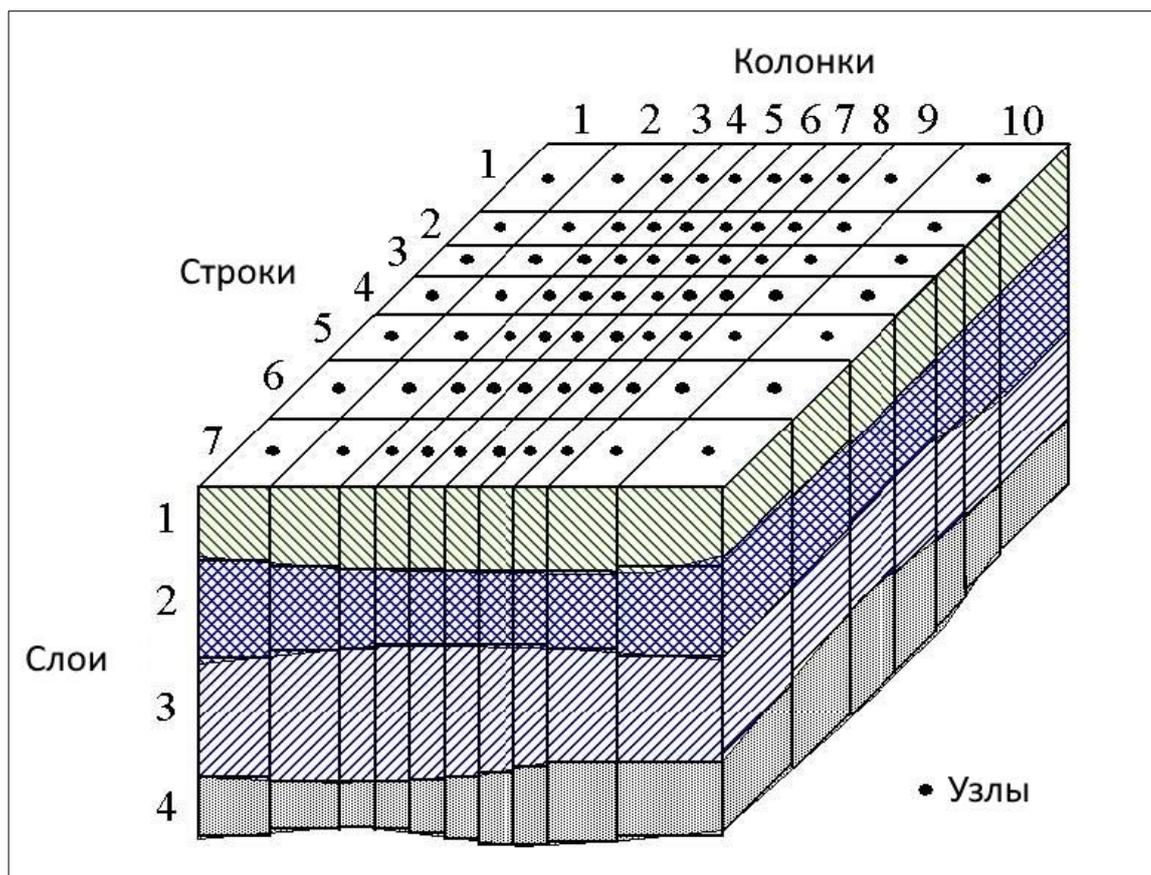


Рисунок 3. 1. Блок-центрированная сетка [30]

Территория объекта исследования, схема которого показана на рисунке 2. 1, имеет размеры: 1717 м по оси x и 1206 м по оси y. Для построения модели использована была выбрана часть территории объекта исследования, природные условия которой вносят наиболее важный вклад для решения геофильтрационной и геомиграционной задач в контексте данной работы.

Область моделирования имеет размеры: 1230 м по оси x и 670 м по оси y. Она была разбита на квадратные блоки со стороной 10 м. Таким образом, площадь области моделирования состоит из 123 столбцов и 67 строк, что составляет 8241 блоков в каждом выделенном слое модели. Схема области моделирования и ее сеточное строение показано на рисунке 3. 2.

Для схематизации геолого-гидрогеологических условий исследуемой территории в модели выделено 3 слоя:

1. Делювиальные отложения четвертичного возраста ($d Q$) и современные аллювиальные отложения ($al Q_H$) вдоль течения ручья Холодный.
2. Элювиальные образования зоны выветривания юрских песчаников и алевролитов ($e J_{1-2}$).
3. Скальные осадочные породы – флишевые отложения юрского возраста (J_{1-2})

Для каждого слоя были заданы мощности так, как показано в таблице 3.1.

Таблица 3. 1 – Модельные мощности слоев

Номер слоя	Название слоя	Мощность, м
1	Делювиальные отложения ($d Q$)	2
	Аллювиальные отложения ($al Q_H$)	2,5
2	Элювиальные образования ($e J_{1-2}$)	3,5–4
3	Флишевые отложения (J_{1-2})	10

Кроме того, для первого слоя задавались абсолютные отметки кровли, соответствующие отметкам рельефа дневной поверхности области моделирования. Рельеф изучаемой территории был схематизирован с помощью ГИС программы Golden Software Surfer 10.

Граничные условия. При построении модели были заданы следующие граничные условия (ГУ):

1. ГУ I рода, для которых значения напоров (H) постоянны во времени, т.е.: $H(t) = const$.
В данной модели задано две ГУ I рода: первая задавалась в первом слое вдоль течения ручья Холодный, значения напоров указывались в соответствии с отметками уровня воды в ручье; вторая – в первом и втором слое по восточной границе модели, значение напоров указывались в соответствии с действительными уровнями грунтовых вод.
2. ГУ II рода, для которых значения расхода воды (Q) постоянны во времени, т.е.: $Q(t) = const$. В данной модели в качестве ГУ II рода были заданы как инфильтрационное питание для первого слоя по всей площади территории, составляющее 108 мм/год. А так же блоки, расположенные западнее ручья Холодный были заданы как ГУ II рода, для которых $Q(t) = const = 0$. Такие блоки называются неактивными, и они не участвуют в моделировании.

Схема расположения граничных условий моделируемой территории показана на рисунке 3. 2.

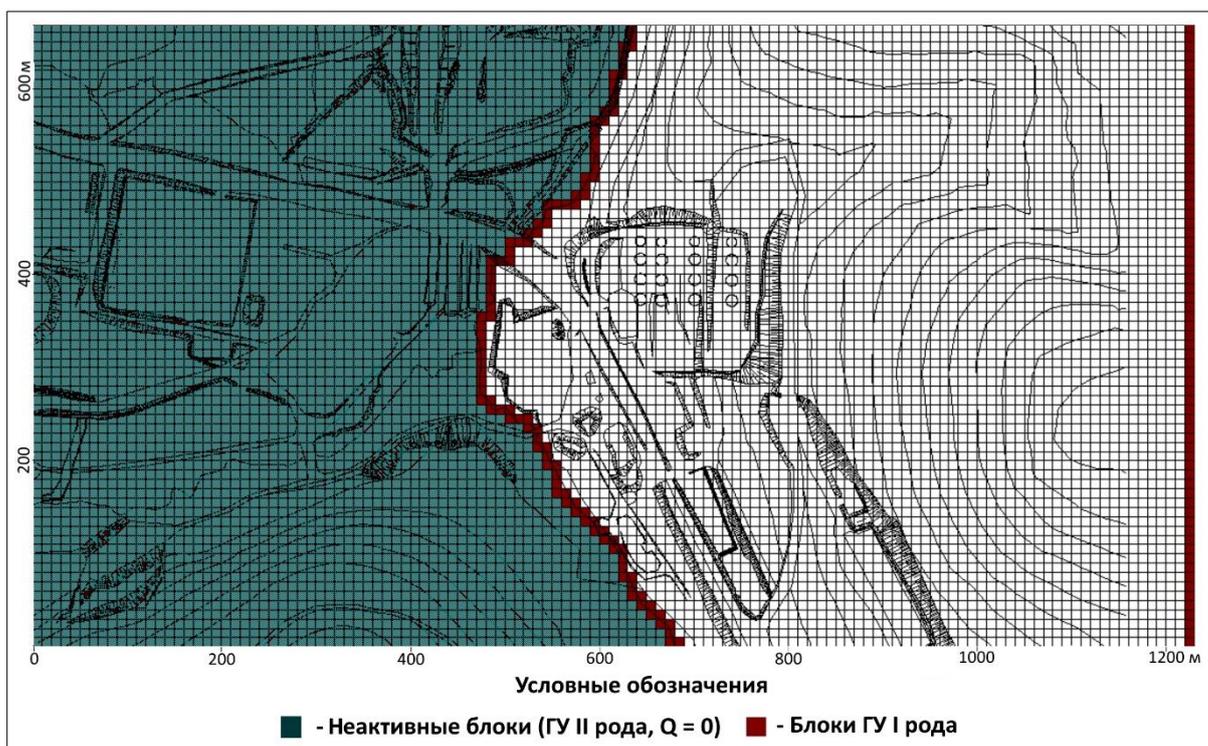


Рисунок 3. 2. Схема области моделирования с заданными граничными условиями и сеточной разбивкой

Гидрогеологические условия. Для схематизации гидрогеологических условий для заданных слоев установлены емкостные параметры пород: упругая и гравитационная емкости, общая и активная пористости; и фильтрационные параметры: коэффициенты фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлении; и. Заданные параметры отображены в таблицах 3. 2 и 3. 3.

Таблица 3. 2 – Емкостные параметры пород модели

Номер слоя	Название слоя	Упругая емкость, m^{-1}	Гравитационная емкость	Общая пористость	Активная пористость
1	Делювиальные отложения (d Q)	0,0001	0,15	0,34	0,20
	Аллювиальные отложения (al Q _H)	0,0001	0,30	0,35	0,30
2	Элювиальные образования (e J ₁₋₂)	0,0001	0,30	0,43	0,35
3	Флишевые отложения (J ₁₋₂)	$0,0001 \cdot 10^{-2}$	0,005	0,10	0,05

Таблица 3. 3 – Фильтрационные параметры пород модели

Номер слоя	Название слоя	Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении, м/сут	Коэффициент фильтрации в вертикальном направлении, м/сут
1	Делювиальные отложения (d Q)	0,25	0,15
	Аллювиальные отложения (al Q _H)	10	5
2	Элювиальные образования (e J ₁₋₂)	17	7
3	Флишевые отложения (J ₁₋₂)	0,0001	0.0001

3.1.2. Калибровка модели

Калибровка модели – это процесс, при котором изначально заданные параметры модели подвергаются уточнению и корректировке. Эта часть процесса моделирования является неотъемлемой и очень важной, она проводится для того, чтобы полученные результаты моделирования наилучшим образом соответствовали действительным измеренным значениям на исследуемом объекте [39].

Результатом моделирования процесса геофильтрации изучаемого объекта является распределение значений напоров в каждом блоке модели. Калибровка модели в данном случае необходима для максимального совпадения полученных модельных значений напоров с измеренными значениями в наблюдательных скважинах. Для этого корректировались значения коэффициентов фильтрации первого и второго слоев, а также значения граничных условий. Изменение значение коэффициентов фильтрации отображено в таблице 3. 4, в которой модель № 1 – модель до калибровки, модель № 2 – после калибровки.

Таблица 3. 4 – Значения коэффициентов фильтрации до и после калибровки

Номер модели	Коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении, м/сут	
	Слой 1 – делювиальные отложения (d Q)	Слой 2 – элювиальные образования (e J ₁₋₂)
1	0,25	17
2	0,20	14,8

Результаты калибровки, а также соответствие модели реальным природным условиям считаются приемлемыми, когда нормализованное среднеквадратическое отклонение (Normalized RMS) менее 10%:

$$\text{Normalized RMS} = \frac{RMS}{(X_{obs})_{max} - (X_{obs})_{min}}$$

где RMS – среднеквадратическое отклонение; X_{obs} – измеренное значение напора в наблюдательной скважине [39].

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}$$

Где R_i – разница между рассчитанным значением напора (X_{cal}) и измеренное значение напора в наблюдательной скважине (X_{obs}) [39].

Нормализованное среднеквадратическое отклонение модели после калибровки рассчитано программой автоматически, и оно составляет 4,672%. Следовательно, результаты калибровки и построенная модель являются приемлемыми. Построенная геофильтрационная модель соответствует природным условиям движения подземных вод исследуемого объекта.

3.2. Геомиграционное моделирование

Модель миграции растворенных загрязняющих компонентов в подземных водах изучаемой территории строилось в компьютерной программе Visual Modflow Classic 2011. 1, с помощью программного модуля MT3DMS.

Модуль MT3DMS позволяет моделировать процессы конвективного переноса, гидродисперсии и химических реакций загрязняющих веществ – сорбции и деструкции в системе потока подземных вод. Данный программный модуль полностью совместим с фильтрационным модулем MODFLOW, являясь как бы его транспортным продолжением. Поле напоров, рассчитываемое с помощью MODFLOW, и заданные матрицы проницаемости используются для нахождения поля скоростей фильтрации. Последнее служит базой при решении задачи переноса [12].

Общее конвективно-гидродисперсионное уравнение, описывающее перенос загрязняющих веществ в трехмерной системе потоков подземных вод, на основе которого выполняются все решения миграционных задач в MT3DMS, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial(n_a C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[n_a D \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} (n_a v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n$$

где C^k – концентрация растворенного вещества k ; n_a – активная пористость среды; t – время; x_i – расстояние вдоль соответствующей оси координат; D – коэффициент гидродисперсии; v_i – действительная скорость фильтрации; q_s – объемный поток на

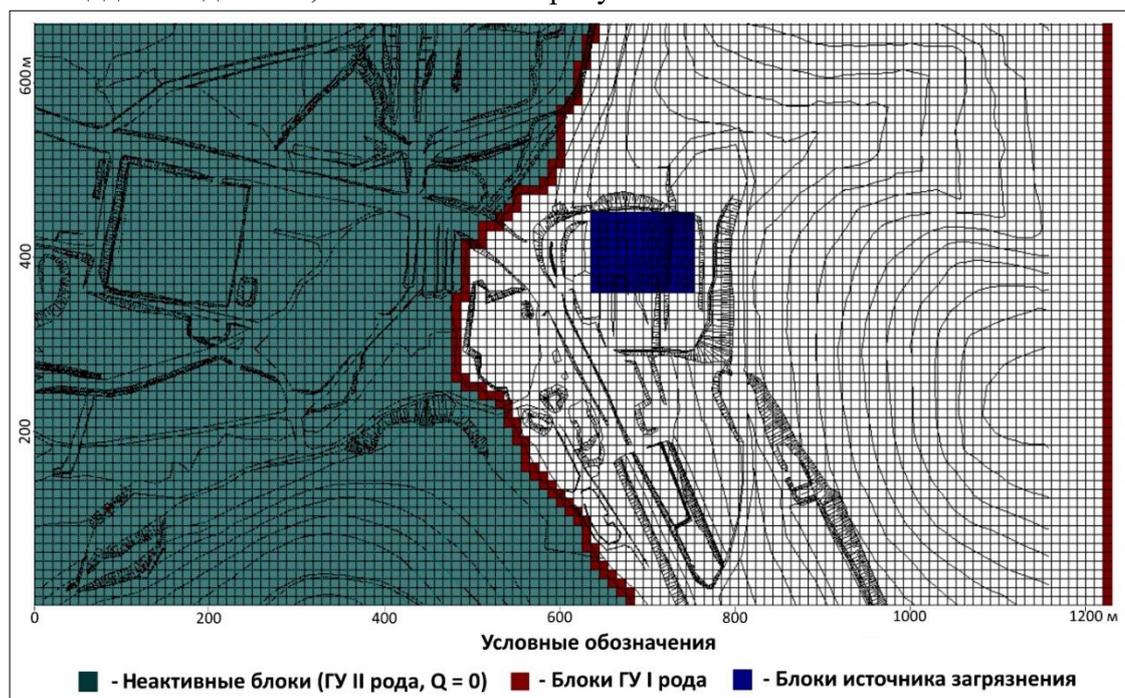
единицу объема, характеризует источники и/или стоки воды; C_S^k – концентрация растворенного вещества k в источнике питания или стоке подземных вод; $\sum R_n$ – показатель химической реакции, учитывает биологическую и химическую деструкцию загрязняющего компонента, а также его сорбцию породой [39].

Модель миграции легких нефтепродуктов в растворенной фазе производилась для оценки ареала распространения потенциального загрязнения в случае наступления двух теоретически возможных внештатных ситуаций, которые различаются по времени воздействия и площади распространения источника загрязнения.

Первая возможная внештатная ситуация – авария на складе ГСМ, при которой произошла залповая утечка большого объема легких нефтепродуктов из всех резервуаров.

Вторая возможная внештатная ситуация – непрерывная, в течении всего срока использования резервуара, утечка небольшого объема легких нефтепродуктов из одного резервуара склада. Срок использования резервуара склада ГСМ составляет 30 лет.

Сначала рассмотрим построение модели для прогноза миграции нефтепродуктов при наступлении первой внештатной ситуации. В данном случае схематизируется ситуация, при которой в водоносный горизонт произойдет кратковременное поступление большого объема легких нефтепродуктов, так что их начальная концентрация в подземных водах в области поступления загрязнения составит 220 мг/л. Областью поступления нефтепродуктов в подземные воды в данной ситуации служит вся площадь склада ГСМ, так показано на рисунке 3. 3.



Однако, после поступления основного объема загрязнителя в подземные воды, водоносный горизонт продолжает подвергаться загрязнению в течение всего срока моделирования за счет инфильтрации загрязненных атмосферных осадков. Инфильтруясь через грунт, загрязненный остаточными нефтепродуктами, атмосферные осадки переносят загрязнитель в водоносный горизонт. При инфильтрации концентрация растворенных нефтепродуктов в атмосферных осадках составляет 220 мг/л.

Для моделирования гидродисперсионного переноса загрязняющих компонентов необходимо установление коэффициента гидродисперсии, который MT3DMS рассчитывает по следующей формуле:

$$D = \alpha_L \frac{V_L^2}{|v|} + \alpha_H \frac{V_H^2}{|v|} + \alpha_V \frac{V_V^2}{|v|} + D_M$$

где D – коэффициент гидродисперсии, м²/сут; α_L – продольная дисперсивность, м; V_L – продольная скорость фильтрации вдоль пути миграции шлейфа, м/сут; α_H – горизонтальная дисперсивность, м; V_H – горизонтальная скорость фильтрации вдоль пути миграции шлейфа, м/сут; α_V – вертикальная дисперсивность, м; V_V – вертикальная скорость фильтрации вдоль пути миграции шлейфа, м/сут; D_M – коэффициент молекулярной диффузии, м²/сут; $|v|$ – модуль скорости фильтрации [39].

Таким образом для моделирования гидродисперсионного переноса загрязняющих компонентов необходимо задать следующие параметры: продольную дисперсивность для каждой ячейки модели; отношение горизонтальной и продольной дисперсивности для каждого слоя; отношение вертикальной и продольной дисперсивности для каждого слоя; коэффициент молекулярной диффузии.

Вышеперечисленные параметры, необходимые для моделирования гидродисперсионного переноса в данном исследовании, были заданы в соответствие с таблицей 3. 5.

Таблица 3. 5 – Параметры гидродисперсии

Номер слоя	α_L , м	α_H/α_L	α_V/α_L
1	3	0,1	0,05
2	3	0,1	0,05
3	3	0,1	0,05

Параметр продольной дисперсивности рассчитывался по формуле, приведенной в исследовании [40]:

$$\alpha_L = 0,83(\log_{10} L)^{2,414}$$

где L – дистанция миграции шлейфа загрязнения, принималась равной минимальному расстоянию от источника загрязнения до ручья – 50 м.

Коэффициент молекулярной диффузии принимается равным нулю для каждого слоя, это объясняется тем, что перемещение загрязнений путем молекулярной диффузии происходит очень медленно, и его можно не учитывать при прогнозах перемещения загрязнений, если речь идет о переносе на расстояния более нескольких метров или о прогнозах на сроки менее 100–200 лет. Рассмотрение молекулярно-диффузионного переноса в горных породах и водоносных пластах представляет интерес лишь в тех случаях, когда продолжительность этого процесса измеряется миллионами лет или когда рассматривается очень малый отрезок пути диффузионного переноса при отсутствии миграции [2].

С учетом способности геологической среды к самоочищению, уменьшается концентрация поллютанта в подземных водах в процессе их миграции. Поэтому при моделировании были схематизированы процессы сорбции и деструкции загрязняющего вещества.

Показатель химических реакций, учитывающий сорбцию загрязняющего вещества и его деградацию, в программном модуле MT3DMS рассчитывается по формуле:

$$\sum R_n = -\rho_b \frac{\partial \bar{C}^k}{\partial t} - \lambda_1 n_a C^k - \lambda_2 \rho_b \bar{C}^k$$

$$\bar{C}^k = K_d \cdot C$$

где ρ_b – объемная плотность породы, кг/м³; \bar{C}^k – концентрация сорбированного вещества k в породе; K_d – коэффициент равновесного сорбционного распределения, м³/кг; C – концентрация растворенного нефтепродукта в водной фазе, кг/м³; $K_d \cdot C$ – коэффициент равновесного сорбционного распределения, м³/кг; C – концентрация растворенного нефтепродукта в водной фазе, кг/м³; λ_1 – скорость деградации растворенной фазы, сут⁻¹; λ_2 – скорость деградации сорбированной фазы, сут⁻¹ [41].

Схематизация сорбционных процессов при геомиграционном моделировании основывается на задании значения коэффициента равновесного сорбционного распределения (K_d).

Данный коэффициент определялся по формуле 1.2 при $f_{OC} = 0,0012$ [32]; $K_{OC} = 83$ см³/г [11]. Таким образом, при построении данной модели $K_d = 1 \cdot 10^{-8}$ л/мг.

Так же при построении модели учитывались скорости деградации растворенного (λ_1) и сорбированного (λ_2) состояния загрязнителя. В данном случае $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,007$ сут⁻¹, что рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{(\ln 2)}{\tau}$$

где λ – скорость деструкции загрязняющего вещества, сут⁻¹; τ – время полураспада вещества, сут, принималось равным 100 сут [41].

Перейдем к рассмотрению построения модели для прогноза миграции нефтепродуктов при наступлении второй внештатной ситуации.

В данном случае моделирование миграции растворенных нефтепродуктов так же осуществляется в режиме нестационарной фильтрации на период, равный сроку эксплуатации резервуаров склада ГСМ, составляющий 30 лет.

Областью поступления нефтепродуктов в подземные воды в данной ситуации служит площадь одного резервуара склада ГСМ, так показано на рисунке 3. 4.

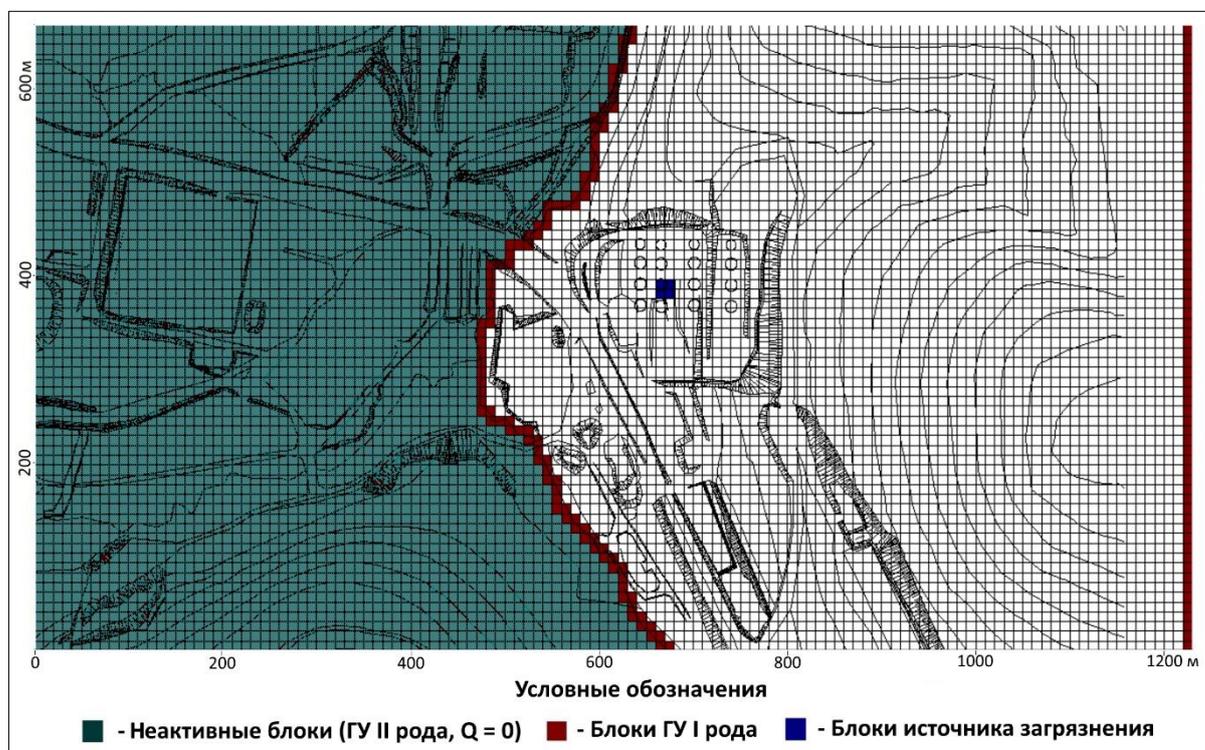


Рисунок 3. 4. Схема расположения источника загрязнения

В данном случае принималось, что в течение всего времени моделирования начальная концентрация легких нефтепродуктов в подземных водах в месте их поступления от источника загрязнения не меняется и составляет 220 мг/л.

Для схематизации гидродисперсионного переноса и химических реакций. Значения параметров гидродисперсии, скорости деструкции вещества из растворенного и сорбированного состояния и коэффициента равновесного сорбционного распределения были заданы так же, как и при моделировании первой внештатной ситуации.

3.3. Расчет миграции линзы легких нефтепродуктов

В данном разделе приведена методика описания миграционного процесса самостоятельной фазы легких нефтепродуктов в рамках упрощенных аналитических решений, основанных на уравнениях многофазной фильтрации, описывающих отдельные стадии миграции – инфильтрацию через зону аэрации и миграцию по поверхности грунтовых вод.

Прежде чем жидкие нефтепродукты оказываются на поверхности грунтовых вод, происходит их субвертикальная миграция в ненасыщенных породах. При нисходящем движении через зону аэрации со временем нефтепродукты достигнут капиллярной зоны и растекутся по ее поверхности. Для преодоления капиллярного давления и внедрения в водоносаченную пористую среду необходимо накопления достаточного слоя (мощности) нефтепродуктов, значение которого определяется по формуле [5, 33]:

$$b_{min} = \frac{2\sigma_{\text{нв}} \cos \theta}{gr_{\text{к}}|\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}|}$$

где b_{min} – минимальная мощность нефтепродукта, м; $\sigma_{\text{нв}}$ – поверхностное натяжение на контакте нефтепродукта и воды, 21 дин/см [11]; θ – краевой угол смачивания, 15° [19]; g – ускорение свободного падения, $9,8 \text{ м/с}^2$; $r_{\text{к}}$ – радиус пор грунта, $0,05 \text{ мм}$; $\rho_{\text{н}}$ – плотность нефтепродукта, $0,75 \text{ г/см}^3$ [22]; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, 1 г/см^3 .

Таким образом, минимальная необходимая мощность линзы легких нефтепродуктов составляет $0,3 \text{ м}$. В дальнейшем все расчеты миграции будем производить для линзы нефтепродуктов такой мощности.

При движении нефтепродуктов в зоне аэрации под действием силы тяжести, их нисходящее движение происходит при единичном гидравлическом градиенте, и скорость движения определяется по следующей формуле [19]:

$$v_{\text{н}} = k_{\text{н}} = \dot{k} \cdot k_{\text{рн}} \quad (3.1)$$

$$\dot{k} = \frac{\bar{\rho}}{\bar{\mu}} \cdot k$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{в}}}; \bar{\mu} = \frac{\mu_{\text{н}}}{\mu_{\text{в}}}$$

где $v_{\text{н}}$ – скорость вертикальной миграции нефтепродукта в зоне аэрации, м/сут; $k_{\text{н}}$ – коэффициент фильтрации среды для нефтепродукта, м/сут; $k_{\text{рн}}$ – относительная фазовая проницаемость для нефтепродукта, является нелинейной функцией мощности слоя нефтепродукта, оценивается по данным графиков зависимости, приведенным в [19]; $\bar{\rho}$ и $\bar{\mu}$ – относительные плотность и динамическая вязкость нефтепродукта; k – коэффициент

фильтрации среды по воде, м/сут; ρ_n и ρ_v – плотность нефтепродукта и воды, г/см³; μ_n и μ_v – динамическая вязкость нефтепродукта и воды, Па·с;

Поступление легких нефтепродуктов, профильтровавшихся через зону аэрации в грунтовые воды приводит к образованию линзообразных подвижных скоплений, движение которых контролируется гидродинамикой фильтрационного потока [19].

Средняя действительная скорость миграции линзы легких нефтепродуктов по поверхности грунтовых вод определяется уравнением многофазной фильтрации 1.1, которое принимает следующий вид:

$$u_n = k \frac{\bar{k}_{rH}}{n\bar{S}_H} \nabla z_{gH} \quad (3.2)$$

где u_n – действительная скорость миграции линзы нефтепродуктов, м/сут; \bar{k}_{rH} – эффективный коэффициент относительной фазовой проницаемости, оценивается по данным графиков зависимости, приведенным в [19]; n – пористость; \bar{S}_H – средняя насыщенность породы нефтепродуктами, является функцией кажущейся мощности слоя нефтепродуктов, оценивается по данным графиков зависимости, приведенным в [19]; ∇z_{gH} – гидравлический градиента в пределах слоя нефтепродуктов, численные оценки показывают, что допустимо следующее приближенное равенство: $\nabla z_{gH} \approx \nabla z_{gB}$, ∇z_{gB} – градиент уклона поверхности грунтовых вод [19].

3.4. Оценка экологического ущерба от загрязнения водных объектов

Одной из задач экогеологической оценки миграции легких нефтепродуктов в районе месторождения «Золотинка», является оценка возможного экологического ущерба от загрязнения вод ручья Холодный, в случае наступлении внештатной ситуации – аварийной утечки нефтепродуктов из резервуаров склада ГСМ.

При обсуждении понятия ущерба в отечественной литературе можно встретить отождествление понятий экологического ущерба, ущерба окружающей природной среде, экономического ущерба. Слово «ущерб» практически всеми понимается однозначно как потеря, убыток, урон, нанесение вреда конкретному объекту. В связи с этим, под ущербом понимать тот урон, который наносится окружающей среде в результате воздействия на нее как природных, так и антропогенных процессов [8].

В данной работе предусмотрена экономическая оценка возможного экологического ущерба, т.е. такого ущерба, нанесенного окружающей природной среде, который наблюдается при отсутствии природоохранных мероприятий [8].

Оценка экологического ущерба от загрязнения водных объектов проводилась в соответствии с нормативным документом «Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» [15].

Согласно пункту 13 части 3 данной методики, в случаях загрязнения водных объектов в результате аварий органическими и неорганическими веществами, пестицидами и нефтепродуктами, исключая их поступление в составе сточных вод и (или) дренажных (в том числе шахтных, рудничных) вод, исчисление размера вреда производится по следующей формуле:

$$Y = K_{\text{вг}} \cdot K_{\text{в}} \cdot K_{\text{ин}} \cdot K_{\text{дл}} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \quad (3.3)$$

где Y – размер ущерба, млн. руб.; $K_{\text{вг}}$ – коэффициент, учитывающий природно-климатические условия в зависимости от времени года; $K_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий экологические факторы (состояние водных объектов); $K_{\text{ин}}$ – коэффициент индексации, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития; $K_{\text{дл}}$ – коэффициент, учитывающий длительность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект при непринятии мер по его ликвидации; H_i – такса для исчисления размера вреда при загрязнении водных объектов i -м вредным (загрязняющим) веществом в результате аварий, млн. руб. [15].

Коэффициенты $K_{\text{вг}}$, $K_{\text{в}}$, $K_{\text{ин}}$, $K_{\text{дл}}$ определяются в соответствии со справочными данными указанной методики. H_i зависит от массы загрязняющего вещества в водном объекте и так же определяется по данным методики [15].

4. Результаты исследования

4.1. Геофильтрационное моделирование

В результате численного моделирования фильтрации подземных вод изучаемой территории было получено поле распределения уровня грунтовых вод, показанное на рисунке 4. 1. На данной схеме точки с одинаковыми абсолютными отметками уровня грунтовых вод соединены гидроизогипсами, которые проведены через каждые 10 м изменения уровня подземных вод.

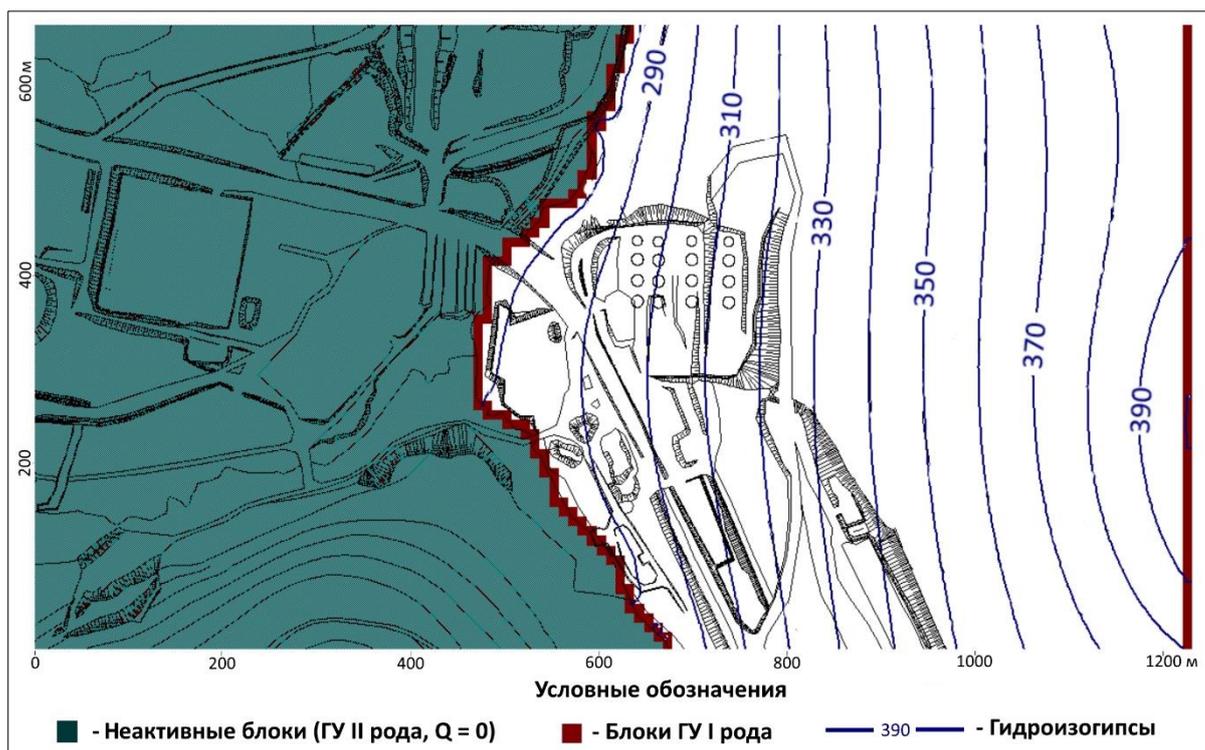


Рисунок 4. 1. Схема распределения уровня грунтовых вод

Так же при моделировании фильтрации подземных во был рассчитан водный баланс области моделирования, значения которого показаны в таблице 4. 1.

Таблица 4. 1. – Водный баланс территории исследования

Области питания/разгрузки	Питание, м ³ /сут	Разгрузка, м ³ /сут
Ручей Холодный	0	10769
Восточная ГУ I рода	10646	0
Инфильтрационное питание	120	0
Всего	10766	10769

На основе построенной модели фильтрации подземных вод изучаемой территории была построена модель миграции загрязняющих компонентов – легких нефтепродуктов в подземных водах.

4.2. Геомиграционное моделирование

С помощью численного моделирования миграции растворенных нефтепродуктов в подземных водах был схематизирован процесс распространений шлейфа потенциального загрязнения с подземными водами во времени в течении 30 лет для двух разных ситуаций.

Сначала рассмотрим результаты, полученные при численном моделировании миграции нефтепродуктов в случае наступления первой внештатной ситуации, которая представляет собой залповую утечку большого объема легких нефтепродуктов из всех резервуаров склада ГСМ исследуемой территории.

На основе смоделированного процесса можно оценить распространение ареала загрязнения подземных вод растворенными легкими нефтепродуктами, время миграции загрязнений до ручья, а также динамику их выноса в ручей.

Выделим три периода миграции: первый – дни-недели от начала загрязнения, вторая – месяцы от начала загрязнения, третья – годы, прекращение поступления загрязнений в подземные воды.

Масса растворенных нефтепродуктов, попавших в водоносный горизонт вследствие утечки составляет 5421 кг.

Рассмотрим **первый период** миграции растворенных нефтепродуктов в подземных водах изучаемой территории. На рисунке 4.2 и 4.3 представлены схемы распространения ареала загрязнения через 20 и 30 суток и через 40 и 60 суток после его начала.

Так через 20 суток после начала загрязнения ареал распространения растворенных загрязнений достигнет зоны разгрузки в ручей. Максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в подземных водах составит 201 мг/л. При этом в зоне разгрузки концентрация нефтепродуктов в подземных водах варьирует от 0,1 до 3,5 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов (НП) в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.2. С учетом расхода воды в реке 35,7 м³/сут, но без учета саморазбавления, средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный в пределах исследуемой территории через 20 дней после начала загрязнения составит 0,0006 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Через 30 дней после начала загрязнения ареал распространения загрязнения продолжит активно увеличиваться. За счет разбавления, сорбции и деструкции нефтепродуктов в подземных водах, максимальная концентрация поллютанта уменьшится и составит 138 мг/л. Увеличится концентрация нефтепродуктов в

подземных водах в зоне их разгрузки в ручей, в данный момент она варьирует от 0,1 до 95 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.2. Средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья через 30 дней после начала загрязнения составит 0,03 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

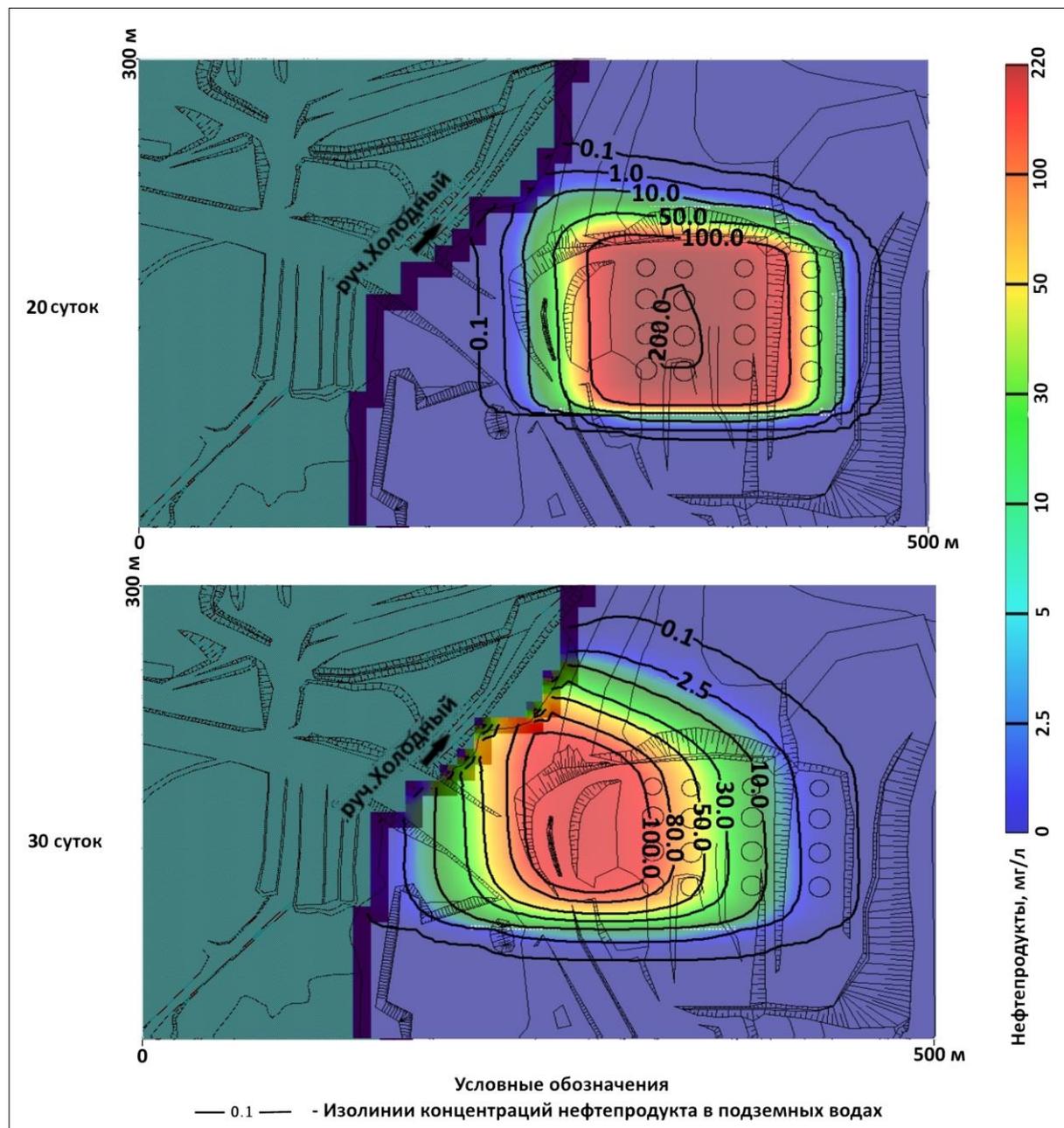


Рисунок 4.2. Схема распространения ареала загрязнения в первые 20 и 30 суток от начала загрязнения

Через 40 дней после начала загрязнения область распространения загрязнения подземных вод продолжит увеличиваться, так как показано на рисунке 4.3. Максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в подземных водах составит 98 мг/л. Также и концентрация нефтепродуктов в подземных водах в зоне их разгрузки

в ручей будет меньше чем в 30 ступи, в данный момент она варьирует от 0,1 до 90 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.2. Средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья через 40 дней после начала загрязнения составит 0,016 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

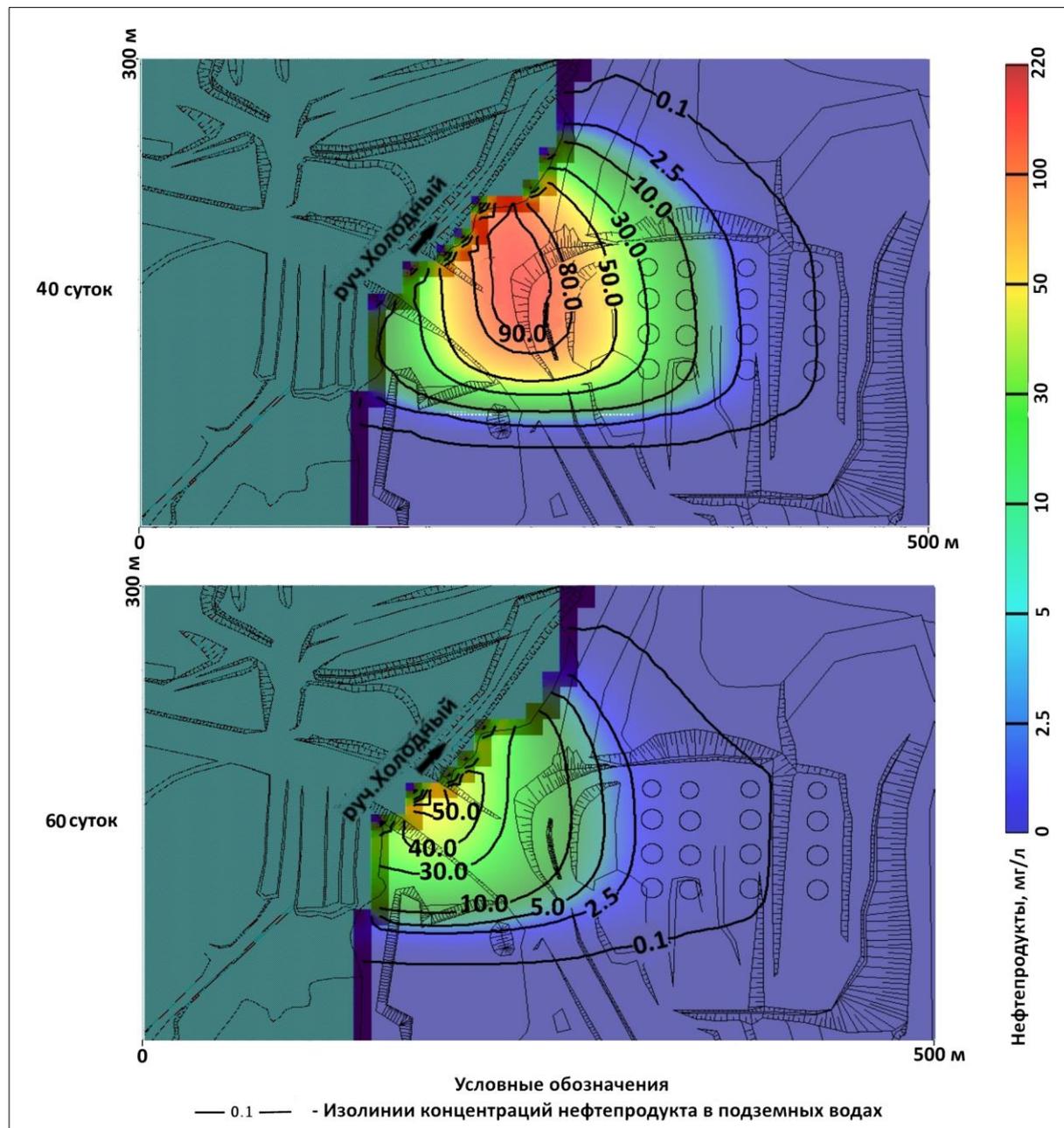


Рисунок 4.3. Схема распространения ареала загрязнения в первые 40 и 60 суток от начала загрязнения

Через 60 дней после начала загрязнения область распространения загрязнения подземных вод начнет уменьшаться. Схема ареала загрязнения подземных вод в данный момент наблюдения показана на рисунке 4.3. Максимальная концентрация загрязняющих веществ в подземных водах составит 52 мг/л. Концентрация

нефтепродуктов в подземных водах в зоне их разгрузки варьирует от 0,1 до 52 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.2. Средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья через 60 дней после начала загрязнения составит 0,035 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Таблица 4.2 – Динамика выноса нефтепродуктов в ручей в первый период распространения загрязнения

Расчетное время от начала загрязнения	Разгрузка загрязненных подземных вод, м ³ /сут	Масса вынесенного НП в ручей, мг/сут	Максимальная концентрация НП в подземных водах при разгрузке, мг/л	Концентрация НП в ручье, мг/л
20 сут	1066	1932·10 ³	3,5	0,0006
30 сут	3216	101813·10 ³	95	0,031
40 сут	3324	107000·10 ³	90	0,035
60 сут	3322	50000·10 ³	52	0,016

Перейдем к рассмотрению **второго периода** миграции растворенных нефтепродуктов в подземных водах изучаемой территории.

В начале данного периода в водоносном горизонте остается около 1000 кг растворенных нефтепродуктов, в то время как основная масса нефтепродуктов, попавших в водоносный горизонт после утечки, разгрузилась вместе с подземными водами в ручей, а также подверглась деградации и сорбции.

Кроме того, в водоносный горизонт, посредством инфильтрации атмосферных осадков, продолжает поступать небольшое количество поллютанта из загрязненных остаточными нефтепродуктами грунтов.

На рисунке 4.4 представлена схемы распространения ареала загрязнения через 80 и 100 суток после утечки.

Как видно из рисунка ареал загрязнения и концентрации нефтепродуктов в подземных водах через несколько месяцев после утечки значительно уменьшатся.

Через 80 суток после утечки максимальная концентрация в подземных водах составляет 22 мг/л. В момент разгрузки концентрация нефтепродуктов в подземных водах варьирует от 0,1 до 22 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.3. С учетом расхода воды в реке, но без учета саморазбавления, средняя концентрация растворенных

нефтепродуктов в водах ручья составит 0,018 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Через 100 суток максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в водоносном горизонте в целом и в зоне их разгрузки подземных вод составляет 6 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.3. С учетом расхода воды в реке, но без учета саморазбавления, средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья составит 0,006 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

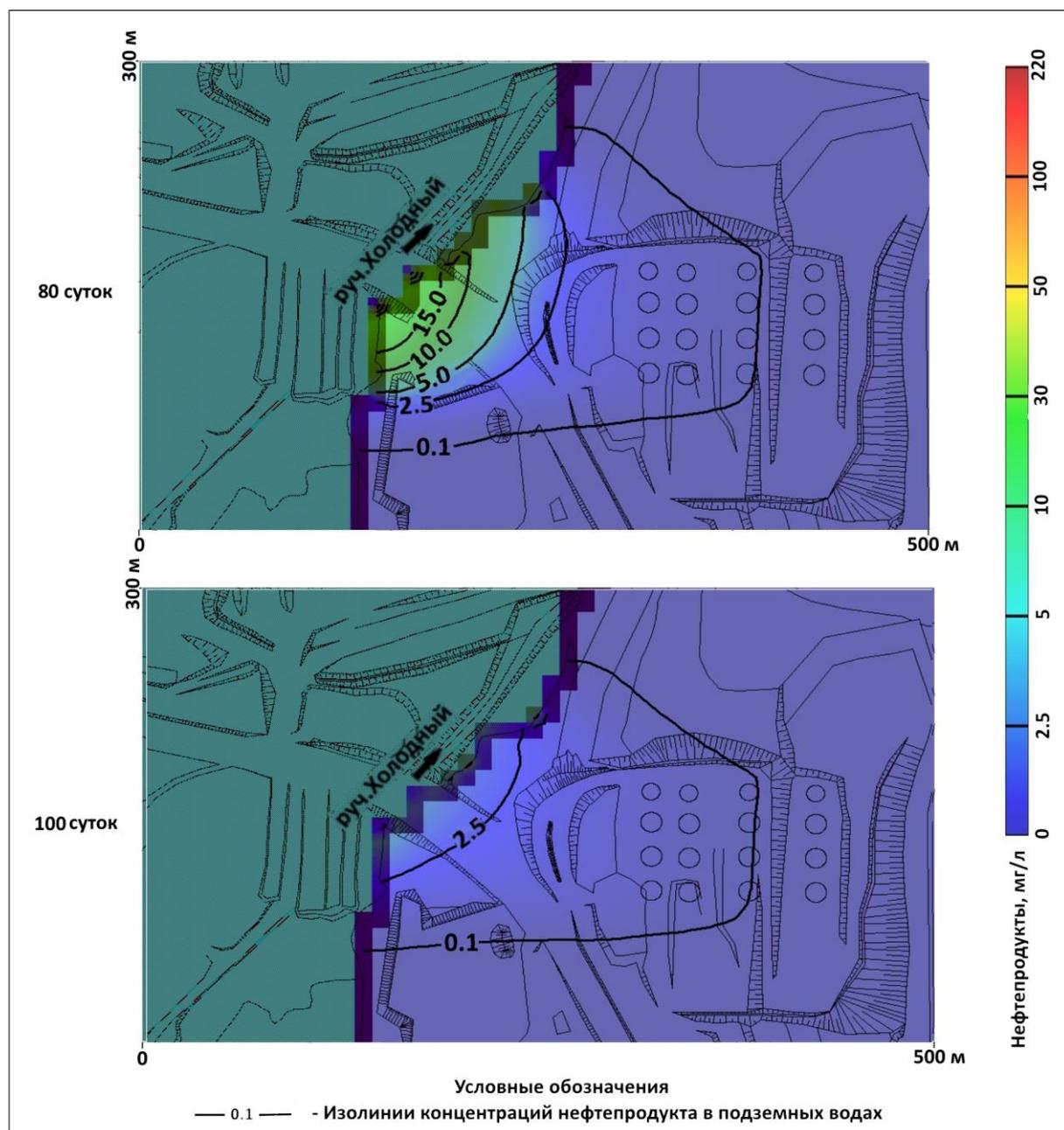


Рисунок 4.4. Схема распространения ареала загрязнения в первые 80 и 100 суток от начала загрязнения

Таблица 4.3 – Динамика выноса нефтепродуктов в ручей во второй период распространения загрязнения

Расчетное время от начала загрязнения	Разгрузка загрязненных подземных вод, м ³ /сут	Масса вынесенного НП в ручей, мг/сут	Максимальная концентрация НП в подземных водах при разгрузке, мг/л	Концентрация НП в ручье, мг/л
80 сут	3330	21000·10 ³	22	0,006
100 сут	4100	8000·10 ³	5,2	0,002

Перейдем к рассмотрению **третьего периода** миграции растворенных нефтепродуктов в подземных водах изучаемой территории.

На рисунке 4.5 представлена схемы распространения ареала загрязнения через 365 суток и 30 лет после утечки.

К данному периоду вся масса растворенных нефтепродуктов, поступивших в подземные воды из-за утечки, покинет пределы водоносного горизонта. Однако подземные воды продолжают оставаться загрязненными. Основной вклад в загрязнения водоносного горизонта вносят остаточные скопления жидких нефтепродуктов, сорбированных на грунтах. Просачиваясь через загрязненный грунт, атмосферные осадки растворяют нефтепродукты и переносят их в водоносный горизонт.

Через 365 суток максимальная концентрация загрязнителя в подземных водах составит 0,25 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.4. Концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный в пределах исследуемой территории через 365 дней после начала загрязнения составит 0,02 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Так в течение всего последующего периода моделирования до 10950 суток (30 лет) после утечки ситуация не будет меняться. Остаточная насыщенности жидких нефтепродуктов, содержащихся в грунтах территории исследования после утечки, обеспечивает постоянное и длительное, измеряемое десятками лет, загрязнение подземных вод, и как следствие, вод ручья Холодный.

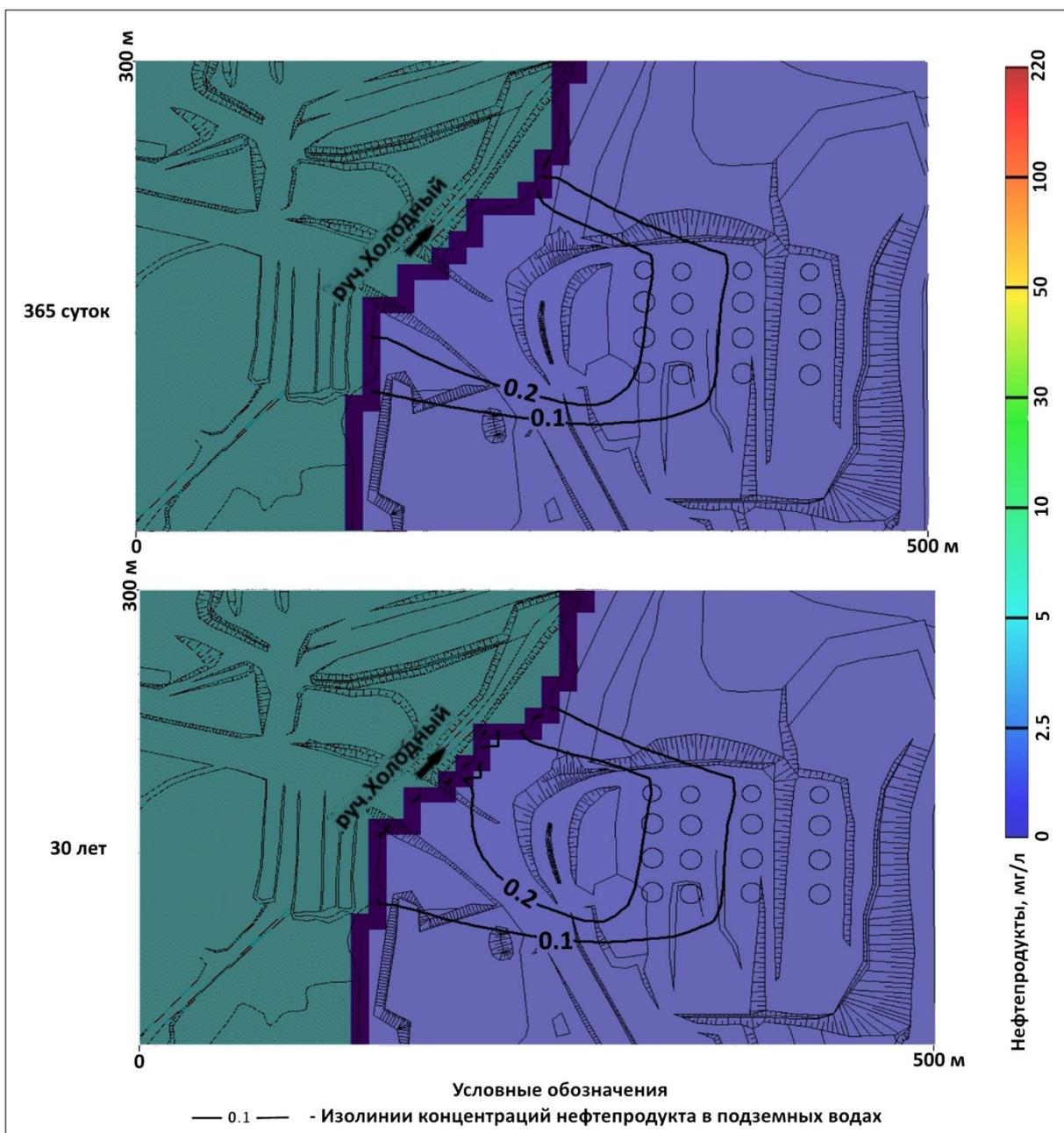


Рисунок 4.5. Схема распространения ареала загрязнения через год и 30 лет от начала загрязнения

В целом за весь срок моделирования, который составляет 30 лет, в подземные воды поступит около 20000 кг растворенных нефтепродуктов. Из них 5421 кг приходится на углеводороды, поступившие непосредственно в момент утечки из всех резервуаров склада ГСМ, в следствие аварии. Оставшаяся масса загрязнения, составляющая около 14500 кг, равномерно поступает в водоносный горизонт в течение всего срока моделирования, что связано с инфильтрацией атмосферных осадков, которые просачиваясь через грунт, загрязненный жидкими иммобилизованными нефтепродуктами, переносят загрязнение в растворенной форме в подземные воды.

Для первого года воздействия на водный объект вследствие наступления первой внештатной ситуации, была произведена оценка ущерба, нанесенного природной среде, от загрязнения вод ручья Холодный. Результаты данной оценки приведены в разделе 4.4 настоящего исследования.

Таблица 4.4 – Динамика выноса нефтепродуктов в ручей в третий период распространения загрязнения

Расчетное время от начала загрязнения	Разгрузка загрязненных подземных вод, м ³ /сут	Масса вынесенного НП в ручей, мг/сут	Максимальная концентрация НП в подземных водах при разгрузке, мг/л	Концентрация НП в ручье, мг/л
365 сут	3330	$2000 \cdot 10^3$	0,25	0,0006
30 лет	3330	$2000 \cdot 10^3$	0,25	0,0006

Перейдем к рассмотрению результатов, полученных при численном моделировании миграции нефтепродуктов в случае наступления второй внештатной ситуации, которая представляет собой непрерывную, в течении всего срока моделирования, утечку небольшого объема легких нефтепродуктов из одного резервуара склада.

На основе смоделированного процесса, также, как и при оценке первой ситуации, можно прогнозировать распространение ареала загрязнения подземных вод загрязненными легкими нефтепродуктами, время миграции загрязнений до водотока, динамику их выноса в ручей.

Выделим несколько основных периодов миграции: первый – дни-недели от начала загрязнения, второй – месяцы, третья – годы.

В первый период происходит оценка распространения ареала загрязнения в течении первых недель от начала загрязнения. На рисунке 4.6 представлена схема распространения ареала загрязнения через 20 и 30 суток после его начала.

За каждый утечки в водоносный горизонт поступает около 58 кг загрязнителя. Максимальная концентрация нефтепродуктов в подземных водах, как и в течении всего времени моделирования, составляет 220 мг/л в зоне поступления загрязнителя в водоносный горизонт, которая указана на рисунке 3.4.

Через 20 суток от начала утечки ареал распространения загрязнения не достигнет зоны разгрузки подземных вод в ручей. Выноса нефтепродуктов в ручей не осуществляется.

Через 30 дней после начала загрязнения ареал распространения растворенных легких нефтепродуктов в подземных водах достигнет зоны разгрузки в ручей. При этом в момент разгрузки концентрация нефтепродуктов в подземных водах варьирует от 0,1 до 5,2 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов (НП) в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.5. С учетом расхода воды в реке 35,7 м³/сут, но без учета саморазбавления, средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный в пределах исследуемой территории через 30 дней после начала загрязнения составит 0,003 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

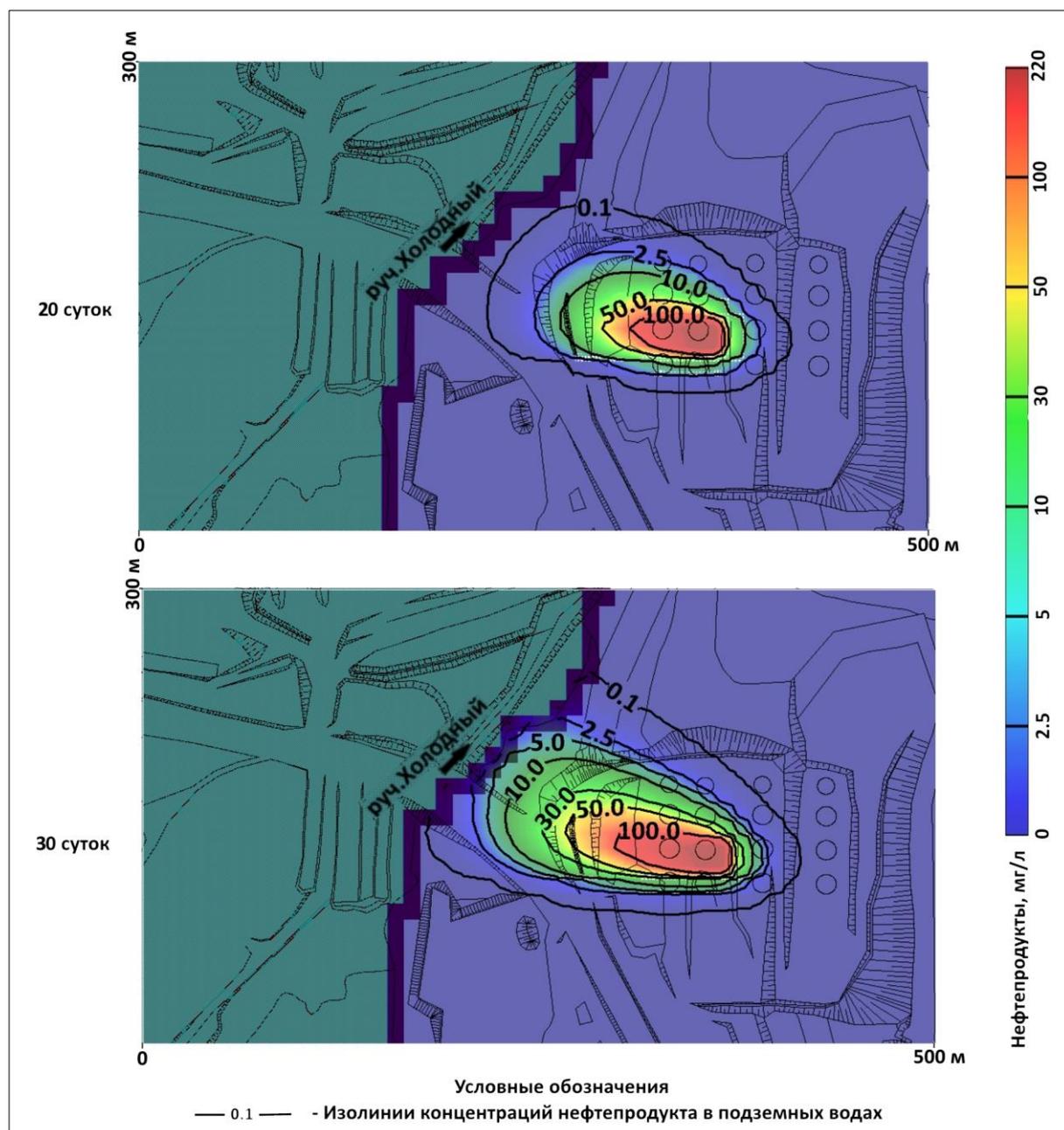


Рисунок 4.6. Схема распространения ареала загрязнения в первые 20 и 30 суток от начала загрязнения

В первые 30 суток от начала загрязнения в водоносный горизонт поступит около 1170 кг растворенных нефтепродуктов. За первые 30 суток общий вынос растворенных нефтепродуктов в ручей составит 89 кг.

Максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в ручье составляет 0,003 мг/л, что не будет превышать значения ПДК для рыбохозяйственных водных объектов. Однако, данное значение превышает фоновые концентрации, равные 0 мг/л.

Таблица 4.5 – Динамика выноса нефтепродуктов в ручей

Расчетное время от начала загрязнения	Разгрузка загрязненных подземных вод, м ³ /сут	Масса вынесенного НП в ручей, мг/сут	Максимальная концентрация НП в подземных водах при разгрузке, мг/л	Концентрация НП в ручье, мг/л
30 сут	1783	$9503 \cdot 10^3$	5,2	0,003
60 сут	2100	$39000 \cdot 10^3$	43	0,01
100 сут	3300	$48000 \cdot 10^3$	52	0,015
365 сут	3550	$56000 \cdot 10^3$	56	0,018
30 лет	3635	$57000 \cdot 10^3$	58	0,018

Во **второй период** происходит оценка распространения ареала загрязнения в первые месяцы от начала загрязнения. На рисунке 4.7 представлена схема распространения ареала загрязнения через 60 и 100 суток после его начала.

Через 60 суток в момент разгрузки максимальная концентрация нефтепродуктов в подземных водах составляет 43 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.5. Концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный в пределах исследуемой территории через 60 дней после начала загрязнения составит 0,01 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Через 100 суток в момент разгрузки максимальная концентрация нефтепродуктов в подземных водах составляет 52 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.5. Концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный в пределах исследуемой территории через 100 дней после начала загрязнения составит 0,015 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

В течение первых месяцев происходит наиболее активное распространение ареала загрязнения подземных вод. В первые 100 суток от начала загрязнения в водоносный

горизонт поступит около 5691 кг растворенных нефтепродуктов. При этом первые 100 суток общий вынос растворенных нефтепродуктов в ручей составит 3152 кг.

Максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в ручье составляет 0,015 мг/л, что не будет превышать значения ПДК для рыбохозяйственных водных объектов. Однако, данное значение превышает фоновые концентрации.

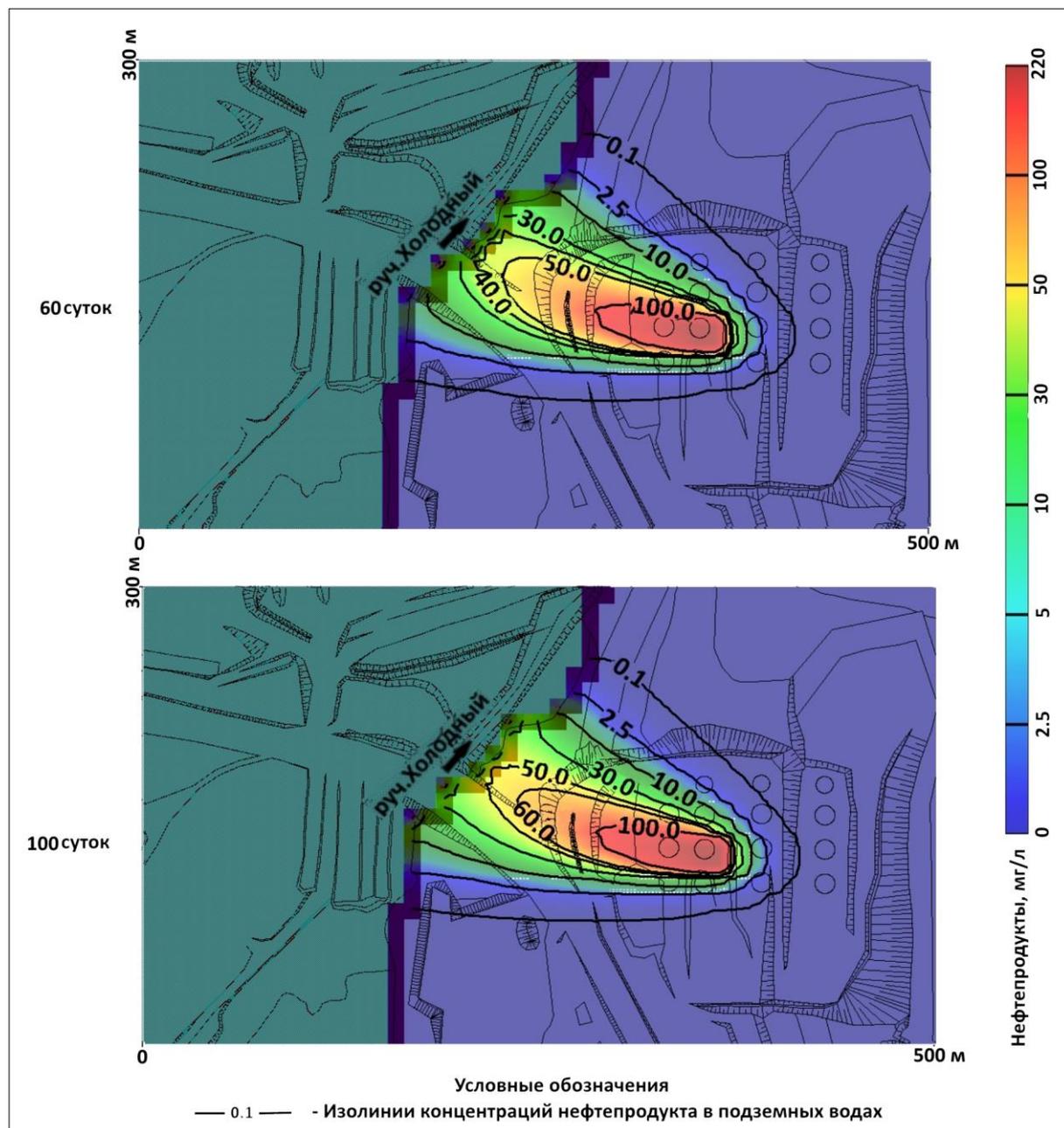


Рисунок 4.7. Схема распространения ареала загрязнения в первые 60 и 100 суток от начала загрязнения

Перейдем к рассмотрению **третьего периода** миграции растворенных нефтепродуктов в подземных водах изучаемой территории.

На рисунке 4.8 представлена схема распространения ареала загрязнения через 60 и 100 суток после его начала.

Через 365 суток в момент разгрузки максимальная концентрация нефтепродуктов в подземных водах составляет 56 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.5. С учетом расхода воды, концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный в пределах исследуемой территории через 365 дней после начала загрязнения составит 0,018 мг/л, что не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

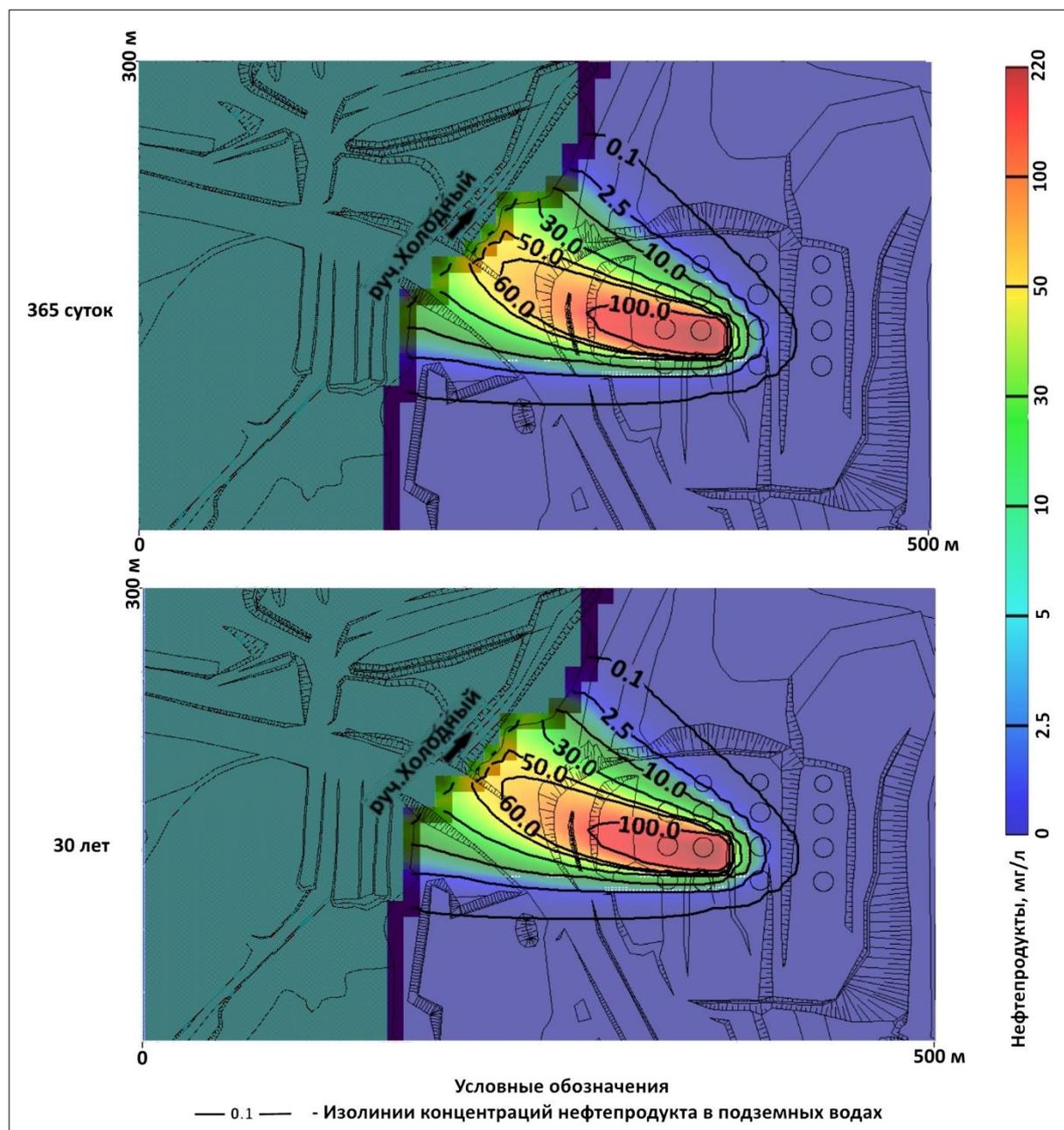


Рисунок 4.8 Схема распространения ареала загрязнения через год и 30 лет от начала загрязнения

Через 30 лет в момент разгрузки максимальная концентрация нефтепродуктов в подземных водах составляет 58 мг/л. Значения выноса растворенных нефтепродуктов в ручей в данный момент наблюдения отражены в таблице 4.5. Концентрация

нефтепродуктов в ручье составит 0,018 мг/л, что не превысит ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

В течение первого года после начала загрязнения происходит наиболее активное распространение ареала загрязнения подземных вод. После чего, ареал загрязнения продолжает увеличиваться, однако значительно медленнее.

К концу первого года загрязнения в водоносный горизонт в сумме поступит около 20580 кг растворенных нефтепродуктов. При этом общий вынос растворенных нефтепродуктов в ручей составит 17171 кг. Для первого года воздействия на водный объект вследствие наступления второй внештатной ситуации, была произведена оценка ущерба, нанесенного природной среде, от загрязнения вод ручья Холодный. Результаты данной оценки приведены в разделе 4.4 настоящего исследования.

К концу срока моделирования миграции загрязнений, который составляет 30 лет, при непринятии природоохранных мероприятий, в водоносный горизонт в сумме поступит около 613000 кг растворенных нефтепродуктов. При этом общий вынос растворенных нефтепродуктов в ручей составит 597000 кг.

Максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в ручье в течение третьего периода миграции составляет 0,018 мг/л, что не будет превышать значения ПДК для рыбохозяйственных водных объектов. Однако, данное значение превышает фоновые концентрации.

4.3. Миграция линзы легких нефтепродуктов

Расчет миграции линзы легких нефтепродуктов проводился для нисходящего движения нефтепродуктов в зоне аэрации и их последующей миграции по поверхности грунтовых вод.

Скорость вертикальной миграции линзы нефтепродуктов в зоне аэрации рассчитывалась по формуле 3.1. Заданные при расчете значения необходимых параметров указаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры миграции нефтепродуктов в зоне аэрации

Плотность, г/см ³		Динамическая вязкость, Па·с		Коэффициент фильтрации среды по воде, м/сут <i>k</i>	Относительная фазовая проницаемость <i>k_{гн}</i>
Нефтепродукта <i>ρ_н</i>	Воды <i>ρ_в</i>	Нефтепродукта <i>μ_н</i>	Воды <i>μ_в</i>		
0,75	1	$6,15 \cdot 10^{-4}$	$10,2 \cdot 10^{-4}$	0,15	0,8

По произведенной оценке, скорость миграции нефтепродуктов через зону аэрации составит 0,15 м/сут. Время достижения нефтепродуктами уровня грунтовых вод, расположенного в среднем на глубине 2 м, составит примерно 13 сут.

Скорость миграции линзы нефтепродуктов в насыщенной зоне оценивалась в соответствии с формулой 3.2. Заданные при расчете значения необходимых параметров указаны в таблице 4.3. Значения относительных плотности и вязкости нефтепродуктов задавались в соответствии с таблицей 4.2.

Таблица 4.3. - Параметры миграции нефтепродуктов в насыщенной зоне

Коэффициент фильтрации среды по воде, м/сут k	Эффективный коэффициент относительной фазовой проницаемости \bar{k}_{rH}	Пористость n	Средняя насыщенность породы нефтепродуктам и \bar{S}_H	Гидравлический градиента в пределах слоя нефтепродуктов ∇z_{gH}
14,8	0,1	0,35	0,4	0,1

Скорость миграции линзы нефтепродуктов по поверхности грунтовых вод составит примерно 1 м/сут. Таким образом, расстояние от источника загрязнения до ручья, составляющее около 150 м, загрязнение преодолеет примерно за 160 сут (с учетом времени инфильтрации поллютанта с поверхности земли).

4.4. Оценка экологического ущерба от загрязнения водных объектов

Оценка экологического ущерба от загрязнения вод ручья Холодный проводилась на основе полученных результатов геомиграционного моделирования. Ущерб оценивался как для первой внештатной ситуации, так и для второй.

Сначала рассмотрим оценку ущерба, нанесенного окружающей среде от загрязнения водотока, при наступлении первой внештатной ситуации.

По данным геомиграционного моделирования, в случае наступления первой внештатной ситуации залповой аварийной утечки нефтепродуктов из резервуаров склада ГСМ, при разгрузке загрязненных подземных вод нефтепродукты будут поступать в воды ручья Холодный. Такая ситуация будет наносить ущерб данному водному объекту в течении первого года после наступления аварии. За этот срок с подземными водами в ручей вынесется около 22 т растворенных нефтепродуктов.

Оценка возможного экологического ущерба от загрязнения вод ручья Холодный, в случае наступлении первой внештатной ситуации проводилась в соответствии с формулой 3.3. Для расчета были приняты следующие значения:

1. $K_{вг}$ – коэффициент, учитывающий природно-климатические условия в зависимости от времени года, определяется по справочным данным методики [15]. Принимался равным 1,15, как среднее значение предложенных коэффициентов, так как наступление внештатной ситуации и последующее загрязнение водотока возможно в любое время года.
2. $K_{в}$ – коэффициент, учитывающий экологические факторы (состояние водных объектов), определялся по справочным данным методики [15], для водных объектов бассейн р. Амур составляет 1,27.
3. $K_{ин}$ – коэффициент индексации, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития, принимается на уровне накопленного к периоду исчисления размера вреда индекса-дефлятора по отношению к 2007 году, который определяется как произведение соответствующих индексов-дефляторов по годам по строке «инвестиций (капитальных вложений) за счет всех источников финансирования». Индекс-дефлятор для 2017 г по отношению к 2007 г составляет 1,9. Он оценивался как произведение индексов-дефляторов с 2008 по 2017 год, значения которых приведены на официальном сайте Министерства экономического развития РФ [17].
4. $K_{дл}$ – коэффициент, учитывающий длительность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект при непринятии мер по его ликвидации. По данным методики, для загрязнения водных объектов нефтепродуктами данный коэффициент принимается равным 5.
5. H_i – такса для исчисления размера вреда при загрязнении водных объектов i -м вредным (загрязняющим) веществом в результате аварий, млн. руб. Определяется по данным методики в зависимости от массы загрязняющего вещества, поступившего в водный объект. При поступлении 5,5 т нефтепродуктов, такса составляет 4 млн. руб.

Таким образом, по произведенной оценке, в случае наступления первой внештатной ситуации, значение ущерба, нанесенного в течение года окружающей среде от загрязнения вод ручья Холодный, при непринятии природоохранных мер, составит 55 млн руб.

Оценка возможного экологического ущерба от загрязнения вод ручья Холодный, в случае наступлении второй внештатной ситуации, которая характеризуется продолжительной утечкой нефтепродуктов малого объема из одного резервуара, проводилась в соответствии с формулой 3.3. В данной ситуации, производился расчет возможного ущерба, нанесенного окружающей среде в течение первого года воздействия

после начала утечки. В течение этого срока в оды ручья при разгрузке загрязненных подземных вод поступит около 17 т нефтепродуктов в растворенном состоянии.

Значения коэффициентов $K_{вг}$, $K_{в}$, $K_{ин}$, $K_{дл}$ принимались такие же, как и при оценке ущерба при наступлении первой ситуации.

Значение H_i по данным методики [15], при выносе 17 т нефтепродуктов составит 11 млн руб.

По произведенной оценке, в случае наступления второй внештатной ситуации, значение ущерба, нанесенного в течение года окружающей среде от загрязнения вод ручья Холодный, при непринятии природоохранных мер, составит 152 млн руб.

Стоит отметить, что вероятность наступления как первой, так и второй внештатной ситуации очень невелика.

Так в работе [26] приводится описание «Методики оценки риска аварий на опасных производственных объектах (складах горюче-смазочных материалов)» [18]. В качестве примера, в данном исследовании проводится расчет частоты утечек резервуаров склада ГСМ, содержащих легкие нефтепродукты.

По данным исследования [26], суммарная частота утечек в следствие аварии для резервуаров склада ГСМ, содержащие легкие нефтепродукты, при мгновенном, залповом выбросе в окружающую природную среду всего объема резервуара, а также при продолжительном выбросе составляет $7,5 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Такая частота наступления утечки характерная для первой внештатной ситуации, рассматриваемой при миграции растворенных нефтепродуктов в настоящей работе.

Характерная частота утечек при наступлении второй внештатной ситуации, рассматриваемой в настоящей работе, по данным исследования [26], суммарная частота утечек для резервуаров склада ГСМ, характеризующихся продолжительным выбросом, но малым объемом выброса, составляет $1,5 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹.

Взяв за основу частоту утечек для резервуаров склада ГСМ, рассчитанную в работе [26], и умножив на срок моделирования процесса миграции – 30 лет, вероятность наступления первой внештатной ситуации и залповой утечки всего объема резервуаров склада ГСМ объекта исследования, составляет 0,002; вероятность наступления второй внештатной ситуации и продолжительной утечки небольшого объема резервуаров составляет 0,045.

5. Разработка природоохранных мероприятий

На основе прогноза миграции нефтепродуктов в подземных водах, можно сделать вывод о том, что основным направлением природоохранных мероприятий в данном исследовании является защита подземных вод от загрязнения и недопущение распространения ареала загрязнения подземных вод в случае наступления внештатных ситуаций.

В целом мероприятия по защите подземных вод от загрязнения можно поделить на профилактические и восстановительные [2].

Целью профилактических мероприятий является недопущения попадания загрязнений в водоносный горизонт. Рассмотрим некоторые профилактические мероприятия, возможные для применения на объекте исследования.

Для предупреждения инфильтрации в подземные воды мобильных нефтепродуктов при их утечке из резервуаров склада ГСМ, возможно создание на территории склада противофильтрационного слоя из практически непроницаемых материалов – полимерных пленок, битумных покрытий, глинобетона или из уплотненных глинистых грунтов [2].

Кроме того, к профилактическим мероприятиям по защите подземных вод от загрязнения нефтепродуктами можно отнести мероприятия по предотвращению утечек нефтепродуктов из резервуаров. К таковым относятся мероприятия по обнаружению утечек с использованием жидкостных, лазерных или вакуумных приборов. Так же важным мероприятием по предотвращению утечек является противокоррозионная защита резервуаров. Противокоррозионная защита достигается путем добавления в нефтепродукты ингибиторов коррозии, нанесением лакокрасочных и полимерных покрытий на внутреннюю часть резервуара, а также установлением на дно резервуара внутренней катодной защиты [27].

Восстановительные мероприятия имеют цель ликвидировать загрязнение водоносного горизонта и восстановить природное качество загрязненных подземных вод [2].

Первоочередной задачей по локализации и ликвидации загрязнения подземных вод легкими нефтепродуктами является прекращение проникновения загрязнения в геологическую среду при дальнейшей эксплуатации объекта посредством ремонта и замены оборудования или путем их ликвидации [14].

К основным ликвидационным методам относится экскавация загрязненного грунта и откачка загрязненных растворенными нефтепродуктами вод или непосредственно

жидких скоплений нефтепродуктов из скважины или дренажной системы. Откачанные воды подвергаются последующей очистке [14, 4].

В рассматриваемых в настоящей работе случаях загрязнения подземных вод, для ликвидации загрязненных подземных вод растворенными нефтепродуктами необходимо произвести откачу одной-двумя скважинами, расположенными в центре области распространения загрязнения. Последующая очистка загрязненных вод проводится с помощью гравитационного отделителя при применении дополнительной водоочистке на вапексовых фильтрах [4].

Более сложными задачами представляются извлечение мобильных нефтепродуктов, а также нефтепродуктов, удерживаемых грунтами [14].

В случаях, рассмотренных в настоящем исследовании, мобильные нефтепродукты, плавающие на поверхности грунтовых вод, располагаются на небольших глубинах. В таких случаях откачка нефтепродуктов ведется из траншей: либо только приповерхностного жидкого слоя, либо путем откачки всей массы жидкости с созданием градиентов и принудительной фильтрации. Обычно откачкой удаётся удалить менее половины нефтепродуктов, что связано с их большой остаточной насыщенностью [14, 11].

Для удаления остаточных скоплений нефтепродуктов в случаях загрязнения, рассматриваемых в настоящем исследовании, наиболее эффективным является применение совокупности методов: биологической очистки, термальных методов, стимулирующих отдачу нефтепродуктов и удаления с помощью аэрирования. Рассмотрим немного подробнее каждый из этих методов.

Применение биологических методов очистки геологической среды, основанных на использовании существующих в грунтовых водоносных горизонтах микроорганизмов, которые разрушают органические загрязнители, иммобилизированные на твердой фазе [14, 11].

Типичную схему биологической очистки можно представить следующим образом: сначала удаляются подвижные нефтепродукты, после чего проводятся лабораторные эксперименты для оценки стойкости остаточных загрязнений относительно бактерий, развивающихся в естественных условиях. Потом, в зону, которая очищается, подается смесь кислорода и питательных веществ для стимулирования роста микроорганизмов [14].

Методы, стимулирующих отдачу нефтепродуктов, основаны на уменьшении поверхностного натяжения или вязкости углеводородов путем закачки: горячей воды или пара, углекислого газа, поверхностно-активных веществ, алкалоидов, щелочей,

полимеров. При этом необходимо обязательно контролировать образующийся при этом поток углеводородов, ибо иначе ими могут быть заняты ранее не загрязненные зоны. В случаях, рассмотренных в настоящем исследовании, наиболее эффективным методом является термальный. Повышение температуры увеличивает растворимость углеводородов, меняют в лучшую сторону их подвижность за счет падения вязкости. При высоких температурах усиливается их испарение [11].

Однако, даже при благоприятном исходе этот метод удаляет не более 30–50% остаточных нефтепродуктов. Поэтому для очистки геологической среды от остаточных скоплений нефтепродуктов необходимо применять совокупность методов [11].

Удаление с помощью аэрирования заключается в пропускании воздуха через грунтовую толщу для испарения летучих компонентов выше уровня грунтовых вод. Пары отсасываются и очищаются. Данный метод применяется совместно с откачкой, методами, которые базируются на разогреве, и методами биодegradации [14].

Заключение

В ходе данной работы были изучены теоретические основы миграции легких нефтепродуктов в подземных водах, а также физико-географические, геологические, гидрогеологические и экологических условия месторождения Золотинка.

Для численного моделирования миграции растворенных нефтепродуктов в пределах изучаемой территории, на основе изученных материалов, была построена геофильтрационная модель, которая является базой для построения модели миграции растворенных нефтепродуктов.

Модель миграции растворенных нефтепродуктов строилась для прогноза распространения загрязнения с подземными водами в случае наступления двух разных внештатных ситуаций. Первая внештатная ситуация представляет собой аварию на складе ГСМ, при которой произошла залповая, непродолжительная утечка большого объема легких нефтепродуктов из всех резервуаров склада. Вторая внештатная ситуация представляет собой непрерывную в течение всего срока моделирования утечку небольшого объема легких нефтепродуктов из одного резервуара склада.

Так было установлено, что при наступлении первой внештатной ситуации максимальное распространение ареала загрязнения подземных вод растворенными нефтепродуктами и максимальный вынос загрязняющего вещества в ручей Холодный придется на 30–40 сутки после начала загрязнения. Через год после утечки вся масса загрязнения покинет пределы водоносного горизонта, однако в подземные воды будут поступать атмосферные осадки, которые просачиваясь через грунт, содержащий остаточные скопления жидких нефтепродуктов, переносят растворенные нефтепродукты в подземные воды. За весь период моделирования максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в подземных водах в зоне их разгрузки в ручей составит 95 мг/л. Максимальный вынос растворенных нефтепродуктов в ручей Холодный составит $107 \cdot 10^6$ мг/сут. За счет смешения вод, максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный составит 0,035 мг/л, что не превышает значения ПДК, однако превышает фоновые концентрации.

При наступлении первой внештатной ситуации, в течение первого года после утечки в ручей выносятся около 5,5 т растворенных нефтепродуктов. По проведенной оценке, в случае наступления первой внештатной ситуации, возможный ущерб, нанесенный природной среде от загрязнения вод ручья Холодный за первый год воздействия при непринятии природоохранных мероприятий, составит 55 млн. руб.

В ходе моделирования второй внештатной ситуации было установлено, что в течение всего срока моделирования ареал распространения загрязнения подземных вод растворенными нефтепродуктами будет увеличиваться. Особенно активное распространение загрязнения будет происходить в первый год от начала утечки. За весь период моделирования максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в подземных водах в зоне их разгрузки в ручей составит 58 мг/л. Максимальный вынос растворенных нефтепродуктов в ручей составит $57 \cdot 10^6$ мг/сут. За счет смешения вод, максимальная концентрация растворенных нефтепродуктов в водах ручья Холодный составит 0,018 мг/л, что не превышает значения ПДК, однако превышает фоновые концентрации.

При наступлении первой внештатной ситуации, в течение первого года после утечки в ручей выносятся около 17 т растворенных нефтепродуктов. По проведенной оценке, в случае наступления второй внештатной ситуации, возможный ущерб, нанесенный природной среде от загрязнения вод ручья Холодный за первый год воздействия при непринятии природоохранных мероприятий, составит 152 млн. руб.

По проведенным расчетам в рамках упрощенных аналитических решений, скорость миграции жидких скоплений нефтепродуктов, находящихся в самостоятельной фазе составит: через зону аэрации – 0,15 м/сут, в насыщенной зоне – 1 м/сут. Это означает, что загрязнение достигнет уровня грунтовых вод через 13 суток после начала утечки. Мигрируя в насыщенной зоне по поверхности грунтовых вод в виде линз, нефтепродукты в самостоятельной фазе достигнут зоны разгрузки в ручей через 160 сут после начала загрязнения.

Основываясь на проведенном прогнозе миграции нефтепродуктов как в растворенной, так и в самостоятельных фазах, возможные природоохранные мероприятия, применяемые для защиты подземных вод от проникновения в них загрязнения и дальнейшего его распространения, были разделены на профилактические и ликвидационные. К профилактическим относятся мероприятия по недопущению попадания загрязнений в водоносный горизонт. К таким мероприятиям относятся как непосредственная защита водоносного горизонта в виде создания непроницаемого слоя в зоне потенциального источника загрязнения, так и мероприятия по предотвращению утечек из резервуаров склада ГСМ. Ликвидационные же мероприятия подразделяются на мероприятия по ликвидации нефтепродуктов в растворенной фазе, по ликвидации жидких скоплений нефтепродуктов в самостоятельной фазе, и ликвидации остаточных скоплений жидких нефтепродуктов, находящихся в иммобилизованном состоянии.

Список литературы

Опубликованная литература:

1. Атлас пресноводных рыб России: В 2-ух т. Т. 1. / Под ред. Ю. С. Решетникова. – М.: Наука, 2003. – 379 с.
2. Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1979. – 253 с.
3. Воробьев Д.С. Влияние нефти и нефтепродуктов на макрозообентос // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. № 2. С. 42–45.
4. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1984. – 262 с.
5. Изучение и очистка водоносных горизонтов и зоны аэрации, загрязненных нефтепродуктами: аналитический обзор / Н. П. Пинчук и др. – М.: НИИ-Природа, 2002. – 48 с.
6. Красная книга Хабаровского края: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и животных: официальное издание / Мин-во природных ресурсов Хабаровского края, Инст. водных и экологических проблем ДВО РАН. – Хабаровск: Приамурские ведомости, 2008. – 632 с.
7. Кржиж Л., Виттленгерова З., Пашковский И. С. Особенности миграции нефтепродуктов в подземных водах (на примере мониторинга последствий аварии в Чешской республике) // Геоэкология. – 2011. – № 2. С. 117–122.
8. Куриленко В.В. Основы управления природо- и недропользованием. Экологический менеджмент. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. гос. ун-та, 2000. – 208 с.
9. Метелев В. В., Канаев А. И., Дзасохова Н. Г. Водная токсикология. – М.: Колос, 1971. – 247 с.
10. Мироненко В. А. Динамика подземных вод: учебник. – 3-е изд., стер. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2001. – 519 с.
11. Мироненко В. А., Петров Н. С. Загрязнение подземных вод углеводородами // Геоэкология. – 1995. – № 1. С. 3–27.
12. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Проблемы гидрогеоэкологии: монография в 3-ех т. Т.1: Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 1998. – 578 с.
13. Мионов О. Г. Взаимодействие морских организмов с нефтяными углеводородами. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 127 с.

14. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н. С. Огняник и др. – Киев: А. П. Н., 2006. – 278 с.
15. Приказ Минприроды России от 13.04.2009 № 87 (ред. от 26.08.2015) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства». – 2015.
16. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». – 2016.
17. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. Прогноз индексов-дефляторов и инфляции до 2030 г. (в %) / Минэкономразвития России. – М.: 2013. – (<http://economy.gov.ru>).
18. Распоряжение ОАО «РЖД» от 21.12.2015 № 3013р «Об утверждении методики оценки риска аварий на опасных производственных объектах (складах горюче-смазочных материалов)». – 2015.
19. Румынин В. Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. – СПб.: Наука, 2011. – 1160 с.
20. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. – 2002.
21. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия / В. М. Гольдберг и др. – М.: Наука, 2001. – 125 с.
22. Фомичева Г. П., Камакин А. М., Федорова И. В. Определение степени токсичности природных поверхностных вод, загрязненных нефтепродуктами, методами количественного химического анализа и биотестирования // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбное хозяйство. – 2016. – № 4. С. 42–49.
23. Цуладзе В. Л. Бассейновый метод выращивания лососевых рыб: на примере радужной форели. – М.: Агропромиздат, 1990. – 156 с.
24. Черкашин С. А. Отдельные аспекты влияния углеводородов нефти на рыб и ракообразных // Вестник ДВО РАН. – 2005. – № 3. С. 83–91.
25. Экологическая гидрогеология: учебник для вузов / А. П. Белоусова и др. – М.: Академкнига, 2006. – 397 с.

26. Экспресс-методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах – складах горюче-смазочных материалов / Невская Е. Е. и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 3. – С. 62–68.
27. Яковлев В. С. Хранение нефтепродуктов. Проблемы защиты окружающей среды. – М.: Химия, 1987. – 152 с.
28. Barker J. P., Patrick G. C., Major D. Natural attenuation of aromatic hydrocarbons in a shallow sand aquifer // Groundwater Monitoring & Remediation. – 1987. – V. 7, Issue 1. P. 64–71.
29. Chen Z., Huan G., Ma Y. Computational methods for multiphase flows in porous media. – Philadelphia: SIAM, 2006. – 549 p.
30. Chiang W., Kinzelbach W. Processing Modflow. A simulation system for modeling groundwater flow and pollution. – Hamburg, 1998. – 334 p.
31. Corapcioglu Y. M., Baehr A. L. A compositional multiphase model for groundwater contamination by petroleum products: Theoretical considerations // Water resources research. – 1987. – vol. 23, № 1. P. 191–200.
32. Guidelines to determine site-specific parameters for modeling the fate and transport of monoaromatic hydrocarbons in groundwater / N. Lovanh et al. – Des Moines, IA: The University of Iowa, 2000. – 51 p.
33. Mercer J., Cohen R. A review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, models, characterization and remediation // Journal of Contaminant Hydrology. – 1990. – V. 6, Issue 2. P. 107–163.
34. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the ground-water flow process / A. W. Harbaugh et al. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2000. – 121 p.
35. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects / National Research Council – Washington, DC: The National Academies Press, 2003. – 280 p.
36. Parker J. C. Multiphase flow and transport in porous media // Reviews of Geophysics. – 1989. – № 27. P. 311–328.
37. Schwille F. Groundwater pollution by mineral oil products // Proceedings of the Moscow Symposium. – 1975. – № 103. P. 226–240.
38. Surfactants and cosolvents for NAPL remediation: a technology practices manual / ed. D. Lowe. – Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. – 427 p.
39. Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual. – Waterloo Hydrogeologic, 2015. – 713 p.
40. Xu M., Eckstein Y. Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale // Groundwater. – 1995. – V. 33, Issue 6. P. 905–908.

41. *Zheng. Ch., Wang. P.* MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; Documentation and user's Guide. – Vicksburg, MS.: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 1999. – 221 p.

Неопубликованная литература:

42. Золоторудное месторождение Золотинка. Площадка под строительство объектов расходного склада ГСМ на месторождении Золотинка. Технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям. – Хабаровск: ОАО ДальГИСЦИЗ, 2008. – 20 с.