

Раздел 2

ГИДРОЛОГИЯ. КЛИМАТ

Section 2

HYDROLOGY. CLIMATE

УДК 556.5.06

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ КРУПНОГО
РАВНИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

А.Т. Зиновьев¹, К.Б. Кошелев¹, С.А. Двинских²

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь,

E-mail: zinoviev@iwep.ru, koshelev@iwep.ru, dvins@mail.ru

Для оценки воздействия нефтяного загрязнения водной среды при эксплуатации куста скважин построена компьютерная модель распространения нефтяного пятна на акватории крупного равнинного водохранилища в окрестности производственной площадки. Рассмотрены сценарные варианты развития аварийной ситуации при различных метеорологических условиях и выполнены их численные расчеты. Обсуждаются результаты вариантных расчетов моделируемых аварийных ситуаций. Установлено, что размеры и положение нефтяного пятна зависят не только от продолжительности разлива нефти и расхода ее сброса, но и от направления ветра. Показано, что существуют условия, при которых нефтяное пятно может попасть в основное русло водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище; поисково-разведочные скважины; аварийная ситуация; нефтяное загрязнение; компьютерное моделирование.

DOI: 10.24412/2410-1192-2022-16702

Дата поступления: 5.10.2022

Экологические последствия аварии 29 мая 2020 г. на ТЭЦ-3 в Кайеркане (район Норильска) связаны с поступлением дизельного топлива в реку Далдыкан, правый приток реки Амбарной, впадающей в крупное озеро Пясино (площадью 735 км²), из которого

вытекает река Пясино, впадающая в Карское море [Катастрофа..., 2020; Bezmaternykh et al., 2021]. Для прогнозирования последствий подобных аварий важно применение численных методов с использованием современных математических моделей, учитывающих

физико-географические особенности загрязненной территории, характеристики гидрологической сети, батиметрию водоемов и водотоков и неоднородность состава нефтепродуктов, поступающих в водные объекты [Лепихин и др., 2009; Математическое ..., 2020]. Для моделирования могут быть использованы гидродинамические модели в двух- и трехмерной постановке, учитывающие морфометрию дна водного объекта и пространственно-временную изменчивость водных потоков [Aleksyuk et al., 2022; Зиновьев, Кошелев, 2013; Лепихин и др., 2013; Прокофьев, 2005; Храпов и др., 2011; MIKE 21; Delft3D]. Кроме того, необходимо привлекать модели переноса загрязнителей, которые учитывают неоднородность состава нефтепродуктов с учетом плотности и испаряемости отдельных фракций, их способности к деструкции и прочее [Zafirakou, 2018; Математическое ..., 2020; Keramea et al., 2021].

Наиболее распространенные в настоящее время модели транспорта нефтепродуктов рассматривают нефтепродукты как единую субстанцию [Paladino, Maliska, 1995; Cnen et al., 2007]. Использование таких моделей не решает все задачи прогнозирования аварийных ситуаций, связанных с разливом нефти, но результаты их применения существенно дополняют опыт моделирования и

прогнозирования распространения нефтепродуктов в водных средах. Применение математических методов является эффективным подходом при анализе аварий на нефтепроводах, разливах нефтепродуктов в результате крупных аварий на речных и морских судах, аварийных ситуаций на нефтехранилищах [Лепихин и др., 2009; Математическое ..., 2020; Wekre et al., 2022]. Поэтому к актуальным задачам следует отнести разработку математических моделей аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации скважин на акватории равнинных водохранилищ.

Целью работы является создание математической и компьютерной моделей распространения нефтяного загрязнения по акватории крупного водохранилища и выполнение сценарных расчетов разлива нефти для различных гидрометеорологических ситуаций. В качестве объекта исследования рассмотрено Камское водохранилище.

Объект исследования

В 2012 году на Камском водохранилище было открыто месторождение нефти им. В. Сухарева. Это стало крупнейшей «находкой» пермских геологов за последние годы [Месторождение..., 2022]. То, что западная часть нефтеносных залежей располагается под дном Камского водохранилища, а восточная

часть – в охранной зоне Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, наложило определенные ограничения на проведение буровых работ: устье скважины должно находиться за пределами запасов калийных солей промышленных категорий. Для решения данного вопроса была предложена отсыпка производственной площадки на акватории Камского водохранилища, которая использовалась для бурения разведочных и эксплуатационных скважин. В связи с

этим встал вопрос о моделировании распространения нефтяного загрязнения по прилегающей акватории водохранилища при возможной аварии на проектируемом объекте при эксплуатации скважин.

Рассматриваемый участок акватории Камского водохранилища находится в пределах Березниковского промузла (расположение района строительства в верхней части водохранилища (от Березниковского моста до п. Кама) показано на рис. 1).

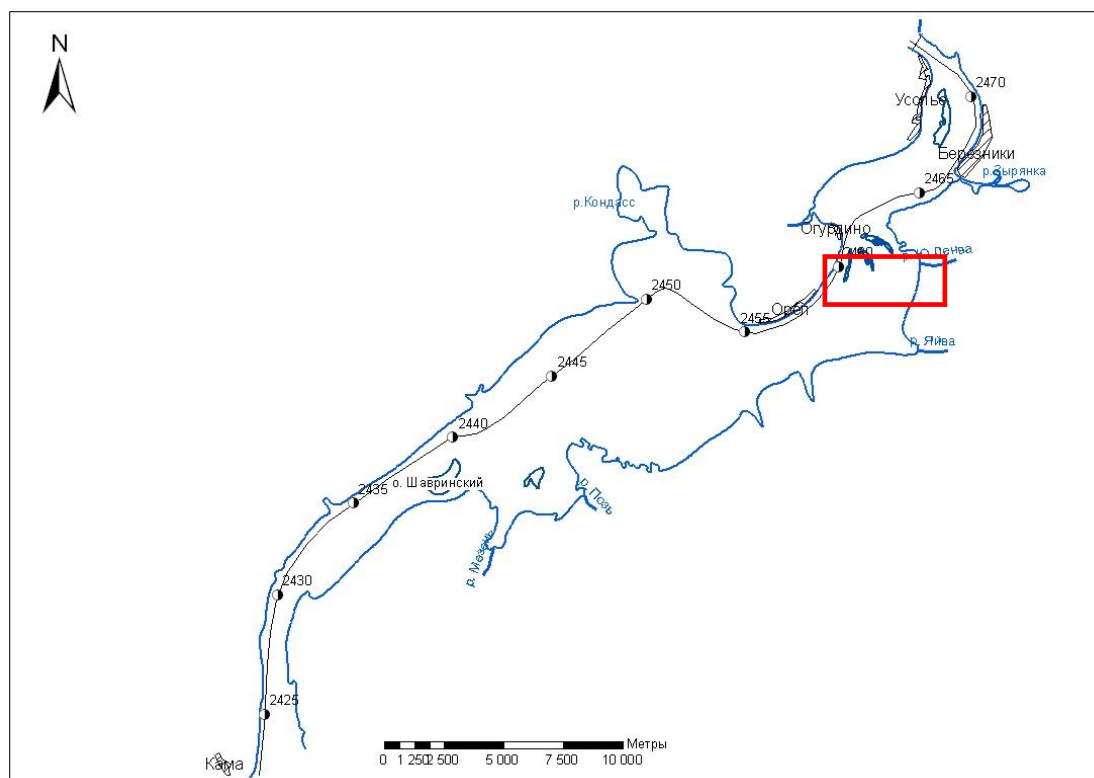


Рис. 1. Расположение района строительства;
 – район строительства

Fig. 1. Location of the developed oilfield land;
 – construction area

Особенности гидрологического режима рассматриваемого участка определяются его расположением на мелководье, обсыхающем при уровне воды 107.00 м в балтийской системе высот (БС) (зимняя и навигационная сработки), с преобладающими глубинами при нормальном подпорном уровне (НПУ) от 1.0 до 1.5 м. Участок покрыт водой в период с первой декады мая по вторую декаду сентября (4.5 месяца). Уровень воды обеспеченностью 1% составляет 110.51 м БС при глубинах от 3.0 до 3.5 м. Специфической особенностью гидрологического режима данного участка является то, что это режим переходный от речного к водохранилищному. При максимальных расходах воды обеспеченностью 1% (11 500 м³/с) участок работает в речном режиме (формируются проточные течения по всей ширине), при расходах обеспеченностью 90% (4 500 м³/с) – как водохранилище (мелководья не работают, но остаются покрытыми водой). При расходах менее 1000 м³/с (меженные периоды) затопленная пойма обсыхает и участок вновь работает как река [Двинских, Китаев, 2008; Многолетние..., 1988].

Математическая модель течения в водохранилище

Рассмотрим постановку задачи о моделировании течения на участке

водохранилища со сложной морфометрией ложа. Пусть используется декартова система координат с осями x, y, z , в которой ось z направлена вверх (рис. 2). Поверхность ложа водохранилища задается уравнением $z = \delta(x, y)$. Зависимостью функции δ от времени пренебрегается. Исходные уравнения для течения рассматриваются в области, граница которой может меняться со временем. Например, в результате повышения или сработки уровня воды. Для описания течения в крупном равнинном водохранилище применяется плановая (2DH) модель мелкой воды. Уравнения, описывающие течение в 2DH-приближении, имеют вид:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Уравнения движения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} + \\ \frac{\partial}{\partial x} hK \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK \frac{\partial u}{\partial y} - r|\vec{u}|u, & \quad (2) \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} &= -gh \frac{\partial H}{\partial y} + \\ \frac{\partial}{\partial x} hK \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK \frac{\partial v}{\partial y} - r|\vec{u}|v, & \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{где } |\vec{u}| = \sqrt{u^2 + v^2}, r = \frac{g}{C_{sh}^2}, C_{sh} = \frac{h^{1/6}}{n}.$$

Здесь h – глубина, u, v – скорости вдоль координат x, y соответственно, g – ускорение свободного падения, $H = h + \delta$ – уровень свободной поверхности, K – коэффициент турбулентной вязкости, C_{sh} – коэффициент Шези, n – коэффициент шероховатости дна.

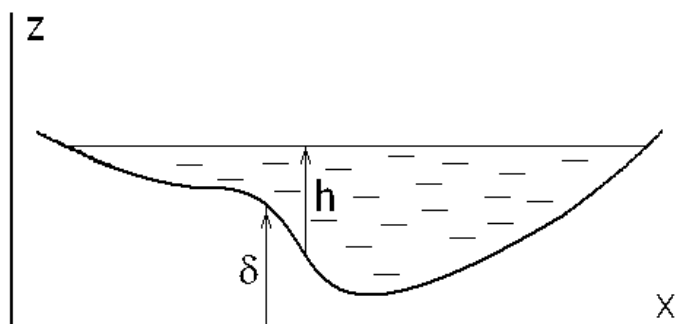


Рис. 2. Система координат и введенные обозначения

Fig. 2. Coordinate system and designations

Граничные условия ставятся на границе области Γ , на внутренней части которой выполняется условие $h > 0$. На боковых границах используются условия прилипания $u = 0, v = 0$. На входе в расчетную область задаются площадь сечения и нормальная к границе входа скорость. Касательная скорость полагается равной нулю. На выходе применяются «мягкие» граничные условия $\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \frac{\partial h}{\partial n} = 0$, где n — нормаль к выходной границе. В часто используемом случае $K = 0$ для спокойного течения на входе задается расход, на выходе — значение уровня свободной поверхности.

В начальный момент времени задаются скорости таким образом, чтобы выполнялось стационарное условие неразрывности.

Моделирование распространения нефтяного загрязнения

Для расчета распространения нефтяного загрязнения используется математическая 2DH-модель, основанная на

интегрировании уравнений массы и импульса вдоль толщины пятна. Модель учитывает растекание нефти за счет конвекции, диффузии, гравитационной силы, а также под действием напряжений, вызванных ветром и течением воды. Поверхностным натяжением нефти пренебрегается. Расчет течения воды выполняется предварительно в рамках 2DH-приближения. При разработке модели полагалось, что данный подход для описания распространения нефтяного пятна справедлив примерно в течение десяти дней после разлива. Предполагается, что вязкость нефти существенно выше вязкости воды (вертикальным движением нефтяного пятна пренебрегается). Уравнения, описывающие распространение нефти в предположении гидростатического распределения давления, приведены ниже [Paladino, Maliska, 1995]:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \bar{h}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{h}}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Уравнения движения:

$$\frac{\partial \bar{h}\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = -g\bar{h}\Delta \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{h}v_{oil} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{h}v_{oil} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{C_f^{wind}U_{wind} - C_f^{water}(\bar{u}-u)}{\rho_{oil}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{h}\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}\bar{v}\bar{v}}{\partial y} = -g\bar{h}\Delta \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{h}v_{oil} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{h}v_{oil} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{C_f^{wind}V_{wind} - C_f^{water}(\bar{v}-v)}{\rho_{oil}}. \quad (6)$$

Здесь $\bar{h}$ – толщина нефтяной пленки на поверхности воды, $\bar{u}, \bar{v}$ – скорости нефти вдоль координат x, y соответственно, ρ_{oil} – плотность нефти, v_{oil} – вязкость нефти, C_f^{wind} и C_f^{water} – эмпирические коэффициенты, U_{wind} и V_{wind} скорости ветра вдоль координат x, y соответственно, $\Delta = \frac{\rho_{water} - \rho_{oil}}{\rho_{water}}$, u, v – рассчитанные скорости течения вдоль координат x, y соответственно.

Методика численного решения задачи о течении в водохранилище (1)–(3) детально описана в [Зиновьев, Кошелев, 2013]. Уравнения для моделирования распространения нефтяного загрязнения (4)–(6) принципиально не отличаются от системы уравнений (1)–(3). Для их численного решения также применяется методика из работы [Зиновьев, Кошелев, 2013]. На одном шаге по времени сначала находятся переменные, описывающие характеристики воды, а затем – переменные, описывающие распространение нефтяного загрязнения.

Компьютерная 2ДН-модель течения в Камском водохранилище

На основе описанной выше численной гидродинамической 2ДН-модели построена компьютерная модель течения для исследуемого участка Камского водохранилища в безледоставный период. Для построения компьютерной модели использована цифровая модель рельефа участка ложа верхней части Камского водохранилища: (2458–2465 км по судовому ходу (с.х.)) (рис. 3). Рис. 3 иллюстрирует сложную морфометрию Камского водохранилища в пределах расчетной области: наличие островов, чередование озеровидных расширений и суженных участков.

Для участка возможного распространения пятна нефтяного загрязнения (2458–2465 км с.х.) характерен широкий диапазон изменения глубин. Так, в пределах 2465–2462 км с.х. старое русло р. Камы приурочено к левому берегу, чем и объясняются большие глубины, достигающие 7–8 м по фарватеру.

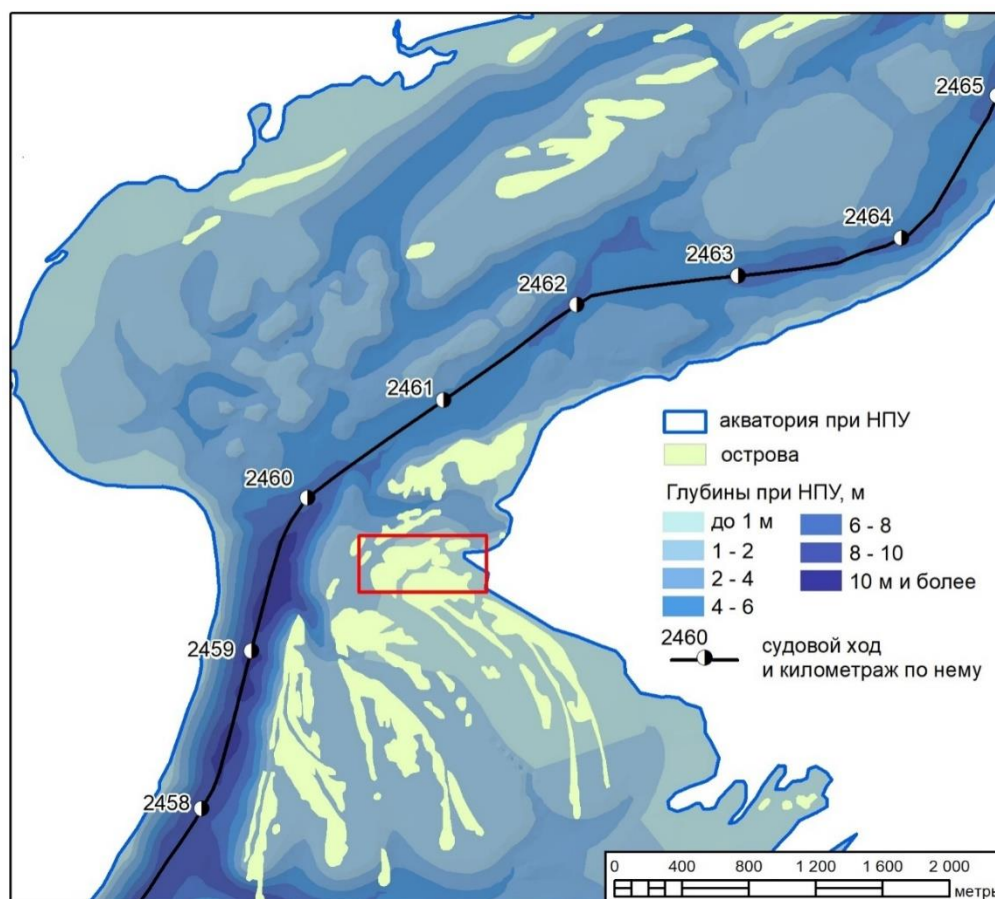


Рис. 3. Морфометрия участка ложа Камского водохранилища в пределах участка разработки Зырянского месторождения; — район строительства

Fig. 3. Morphometry of the Kama reservoir bed site within the Zyryansk oilfield; — construction area

Правобережная часть от г. Усолье до с. Огурдино преимущественно мелководная с глубинами до 2 м, водохранилище здесь принимает р. Огурдинка (2462 км с.х.). Цепочка островов близ правого берега отделяет основное старое русло р. Камы от существовавшей до заполнения водохранилища ярко выраженной протоки, глубины в которой при отметке НПУ 108.50 м БС достигают 4 м. Ширина водоема на этом участке порядка 2.2 км [Атлас, 2000; Пьянков, Калинин, 2011].

На отметке судовой хода 2461.5 км чаша водохранилища сужается до 1.5 км, а ниже образует озеровидное расширение шириной до 3.5 км; при этом старое русло прижимается к правому берегу, а у левого образуется карманообразный залив. Глубины по старому руслу увеличиваются до 11 м. Правый берег обрывистый с пляжем, в пределах 2459.3–2458.8 км с.х. обрывистый без пляжа, ниже расположены такелажный причал и причалы Камлесплава. Левобережная часть, на которой расположен исследуемый участок, —

затопленная поверхность террасы с множеством естественных островов-останцев прирусловых валов, глубины на участке не превышают 2.0 м [Атлас, 2000; Пьянков, Калинин, 2011].

Для рассматриваемого участка водохранилища построена расчетная сетка, включающая более 50000 ячеек. При построении компьютерной 2DH-модели учтены расходы воды основных притоков, впадающих в Камское водохранилище на рассматриваемом участке (таблица 1), в качестве граничных условий задавался расход воды во входном (верхнем) створе Q ($\text{м}^3/\text{с}$); в нижнем створе задавался уровень воды $H(\text{м})$, принятый равным НПУ.

Данные для моделирования нефтяного загрязнения

По сценарию аварийной ситуации предполагается утечка нефти из нефтегазосборного коллектора (НГСК), соединяющего куст скважин с береговыми сооружениями. Для моделирования

аварийной ситуации полагается следующее: на технологической площадке имеются 3 скважины, для которых дебит нефти одной скважины равен $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ и 2 скважины, для которых дебит по нефти одной скважины – $165 \text{ м}^3/\text{сут}$. Суммарная перекачка нефти для 5 скважин равна $630 \text{ м}^3/\text{сут}$. Предполагается, что место порыва – это участок нефтепровода между технологической площадкой и берегом водохранилища на половине подводного участка трубы.

Моделирование производится при скоростях ветра 0 и 10 м/с и при наиболее опасном направлении ветре юго-восточного (ЮВ) направления, поскольку при таких метеорологических условиях пятно загрязнения будет выноситься в акваторию Камского водохранилища и возможно возникновение неблагоприятных экологических последствий для п. Орел и п. Огурдино.

Таблица 1

Расходы воды (Q), используемые при моделировании (по данным Государственного водного кадастра и формы статистической отчетности предприятий 2ТП-водхоз)

Table 1

Water discharges (Q) used in modeling (according to the State Water Cadastre and Statistical Reporting from 2TP-vodkhoz enterprises)

р. Кама – Березники	р. Толыч	р. Зырянка	р. Яйва	р. Ю. Ленва	р. Кондас
Расход воды (Q , $\text{м}^3/\text{с}$)					
850	1.588	2.03	75	0.44	7.04

Рассмотрим два варианта реализации аварийной ситуации на НГСК между технологической площадкой и берегом при порыве трубопровода:

Вариант аварийной ситуации №1.
Трубопровод при порыве – утечка в течение 6 часов 25 процентов максимального объема прокачки нефти между запорными задвижками на порванном участке трубопровода. Потеря нефти при порыве – 39.4 м³, время истечения – 6 часов. При расчетах распространения нефти по акватории Камского водохранилища целесообразно рассматривать именно этот вариант аварийной ситуации.

Вариант аварийной ситуации №2.
Трубопровод при проколе – утечка 2 процента максимального объема прокачки в течение 14 дней. Общий объем потерь нефти – 176.4 м³.

С учетом метеорологических условий моделированию распространения пятна нефтяного загрязнения при аварии

на Зырянском месторождении подлежат следующие 4 сценария аварийной ситуации (таблица 2):

1) расход сброса нефти $q_{сбр} = 6.567 \text{ м}^3/\text{час}$, продолжительность поступления загрязняющих веществ 6 часов, скорость ветра 0 м/с;

2) расход сброса нефти $q_{сбр} = 6.567 \text{ м}^3/\text{час}$, продолжительность поступления загрязняющих веществ 6 часов, скорость ветра 10 м/с, направление ветра ЮВ;

3) расход сброса нефти $q_{сбр} = 0.525 \text{ м}^3/\text{час}$, продолжительность поступления загрязняющих веществ 14 суток, скорость ветра 0 м/с;

4) расход сброса нефти $q_{сбр} = 0.525 \text{ м}^3/\text{час}$, продолжительность поступления загрязняющих веществ 14 суток, скорость ветра 10 м/с, направление ветра ЮВ.

Таблица 2

Расход воды, скорость ветра, время разлива, используемые при моделировании

Table 2

Water discharge, wind speed, spill time used in modeling

Характеристика	Вариант 1		Вариант 2	
	сценарий 1	сценарий 2	сценарий 3	сценарий 4
Скорость и направление ветра V, м/с	0	10, ЮВ	0	10, ЮВ
Время разлива T, сут	0.25	0.25	14	14
Расход сброса Q, м ³ /час	6.567	6.567	0.525	0.525

Результаты и их обсуждение

Результаты гидродинамических расчетов. Используемый подход для расчета распространения пятна нефтяного загрязнения предполагает, в первую очередь, расчет поля скорости течения на участке водохранилища, где расположены скважины. На рис. 4 представлены рассчитанные линии тока и глубины на участке акватории вблизи производственной площадки.

Расчеты по компьютерной гидродинамической 2DH-модели показали, что уклон водной поверхности на рассматриваемом участке водохранилища – $1.3 \cdot 10^{-6}\%$.

В целом, падение уровня воды по длине участка с севера на юг плавное, без резкого изменения уклонов.

Расчеты поля скорости в моделируемой области показали следующее. На ее верхнем участке от Березниковского моста до места впадения р. Зырянки распределение поверхностных скоростей по ширине водохранилища в целом однородное, средняя скорость 0.20–0.25 м/с. На участке от р. Зырянка до г. Орел ярко выражена гидродинамическая ось, прижатая сначала к левому берегу, а затем в районе с. Огурдино и г. Орел к правому.

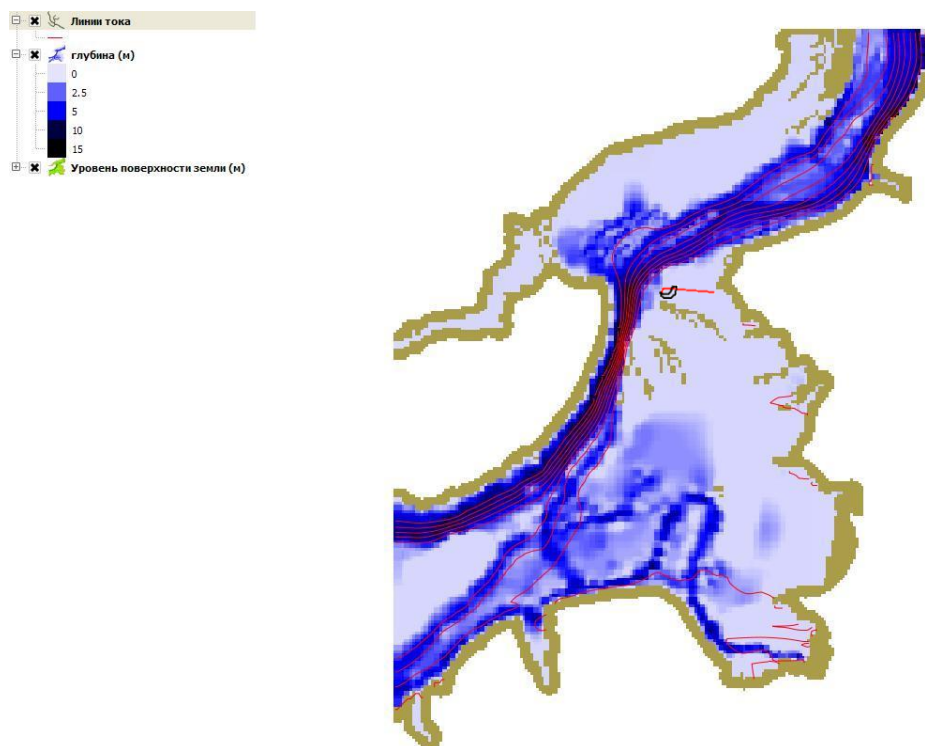


Рис.4. Рассчитанные линии тока и глубины в районе строительства;

— производственная площадка, участок скважин и нефтепровода

Fig. 4. Calculated lines of current and depths in the construction area;

— production floor space, nested wells and oil pipeline site

Срединный озеровидный участок (от Кондасского залива до места впадения р. Мезень), ширина которого варьируется от 4 до 8 км, характеризуется меньшими поверхностными скоростями течения до 0.10–0.15 м/с, что объясняется резким расширением участка и распылыванием основного скоростного потока. В нижней части моделируемого участка (ниже о. Шавринский Бор) в месте сужения водохранилища максимальные скорости постепенно возрастают до 0.20–0.25 м/с.

Таким образом, на основе плановой (2DH) гидродинамической модели построена компьютерная плановая модель течения на исследуемом участке Камского водохранилища для летнего периода при уровне водной поверхности, близком к НПУ. Данная модель используется в качестве базового «гидродинамического» блока при построении компьютерной модели распространения нефтяного загрязнения.

Результаты расчетов нефтяного загрязнения. Модельные расчеты распространения возможных зон загрязнений по акватории Камского водохранилища проводились для сценариев аварийной ситуации на Зыряновском месторождении согласно таблице 2. Рассмотрим результаты выполненных расчетов.

Сценарий 1. На рис. 5 представлена зона разлива нефтяного загрязнения при

аварийной ситуации на площадке бурения и нефтепроводе. Поскольку сценарий предусматривает безветренный режим, то распространение пятна подчиняется распределению векторного поля скоростей воды. Из-за их малости пятно фактически будет располагаться вблизи источника выброса. Таким образом, через 12 часов после начала разлива нефтяное пятно достигнет максимальных размеров (рис. 6); максимальная толщина пленки 0.1 мм будет наблюдаться у берега. Толщина пленки в пределах пятна меняется от 0.01 до 0.1 мм, концентрация – от ~80 до ~800 мг/л. Площадь нефтяного пятна составляет около 1.32 км². Положение границы нефтяного пятна определялось по толщине пленки, равной 10⁻⁹ м, что соответствует концентрации нефтепродуктов 0.008 мг/л.

Сценарий 2. Через 12 часов после начала разлива пятно загрязнения (рис. 7, 8) переместится по направлению ЮВ ветра к противоположному берегу через глубоководную зону водохранилища, где проходит основной скоростной поток. Площадь загрязнения у берега будет очень мала, но толщина пленки будет значительна. А именно, толщина пленки нефти вблизи берега чуть больше 0.5 мм (концентрация ~4000 мг/л). Площадь нефтяного пятна со значительными концентрациями нефтепродуктов составит 0.385 км².

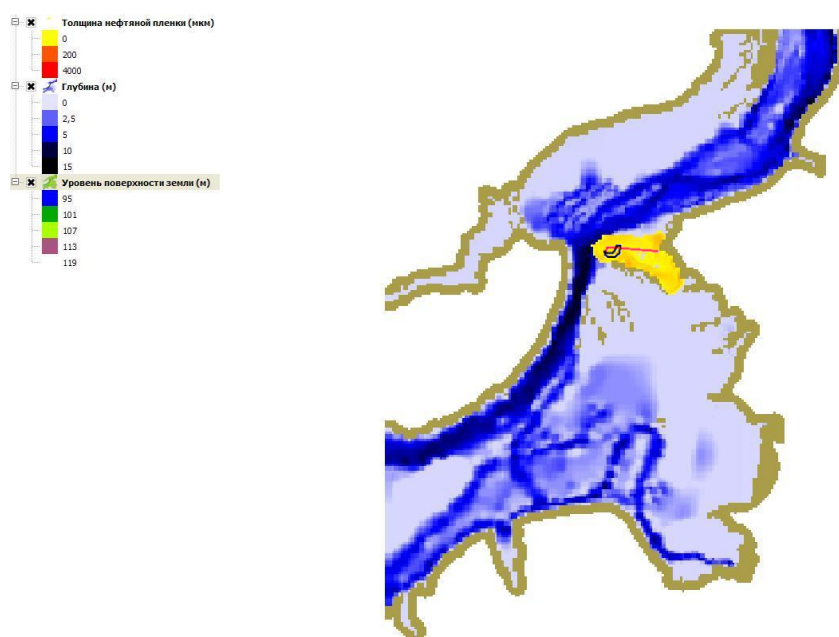


Рис.5. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 12 часов после начала разлива, сценарий 1 (толщина нефтяной пленки)

Fig. 5. Spread of the contamination zone at the design site 12 hours after spill onset, scenario 1 (oil film thickness)

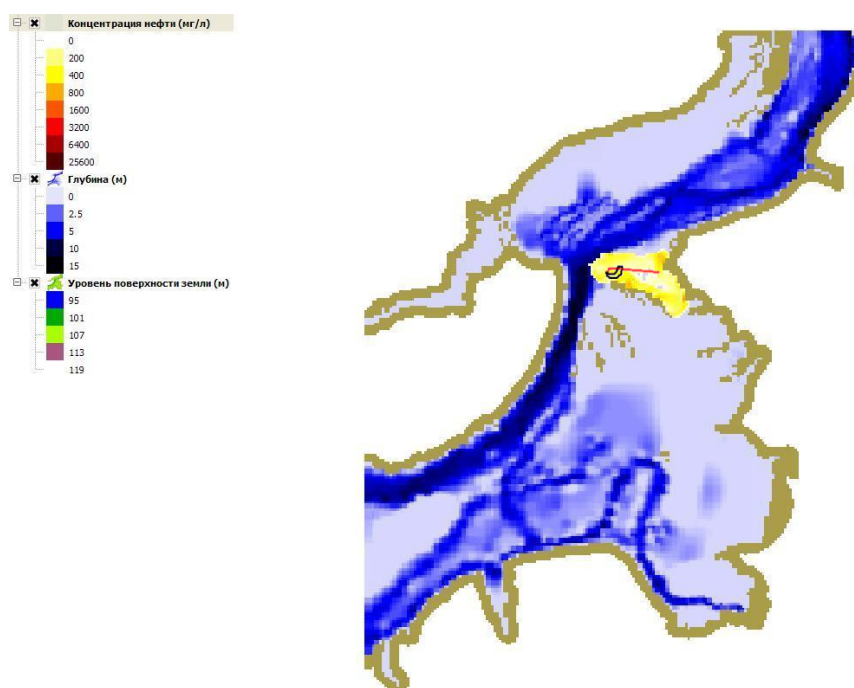


Рис. 6. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 12 часов после начала разлива, сценарий 1 (концентрация нефтепродуктов)

Fig. 6. Spread of the contamination zone at the design site 12 hours spill onset, scenario 1 (concentration of petroleum products)

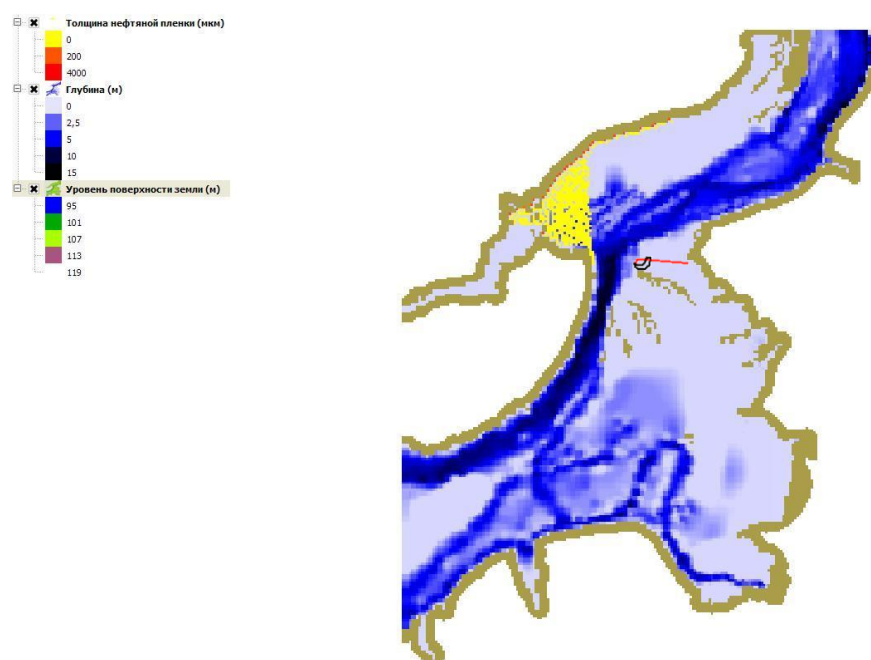


Рис. 7. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 12 часов после начала разлива, сценарий 2 (толщина нефтяной пленки)

Fig. 7. Spread of contamination zone at the design site 12 hours after spill onset, scenario 2 (oil film thickness)

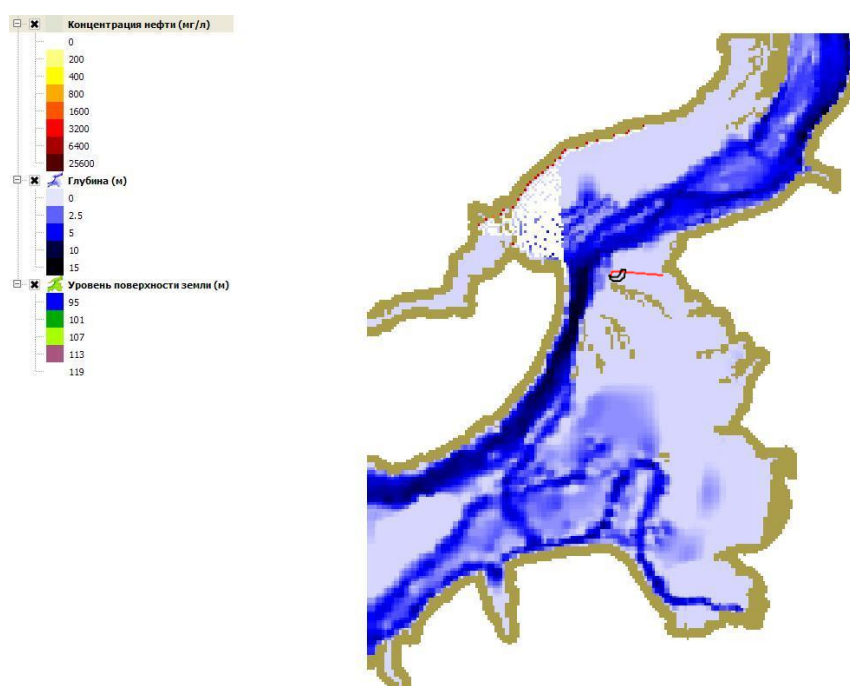


Рис. 8. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 12 часов после начала разлива, сценарий 2 (концентрация нефтепродуктов)

Fig. 8. Spread of contamination zone at the design site 12 hours after spill onset, scenario 2 (concentration of petroleum products)

Сценарий 3. На рис. 9, 10 представлена зона разлива нефтяного загрязнения при аварийной ситуации на нефтепроводе. Поскольку данный сценарий предусматривает безветренный режим, то распространение пятна подчиняется распределению векторного поля скоростей течения (рис. 7). Площадь загрязнения будет самой большой из рассматриваемых сценариев и составляет примерно 17.5 км². Типичные концентрации нефти будут в диапазоне 10–50 мг/л. При этом надо учитывать, что часть нефтепродуктов будет унесена течением за пределы участка изысканий.

Сценарий 4. Моделирование показало, что ветрами ЮВ направления пятно вынесется через глубоководную зону водохранилища (рис. 11, 12) к противоположному берегу аналогично сценарию 2. Площадь нефтяного загрязнения относительно невелика, близка к аналогичной площади в сценарии 2 и составляет 0.375 км². Однако максимальная толщина пленки (и, соответственно, концентрации нефтепродуктов) будет примерно в 5 раз больше – 2.5 мм (концентрация нефтепродуктов – около 20000 мг/л).

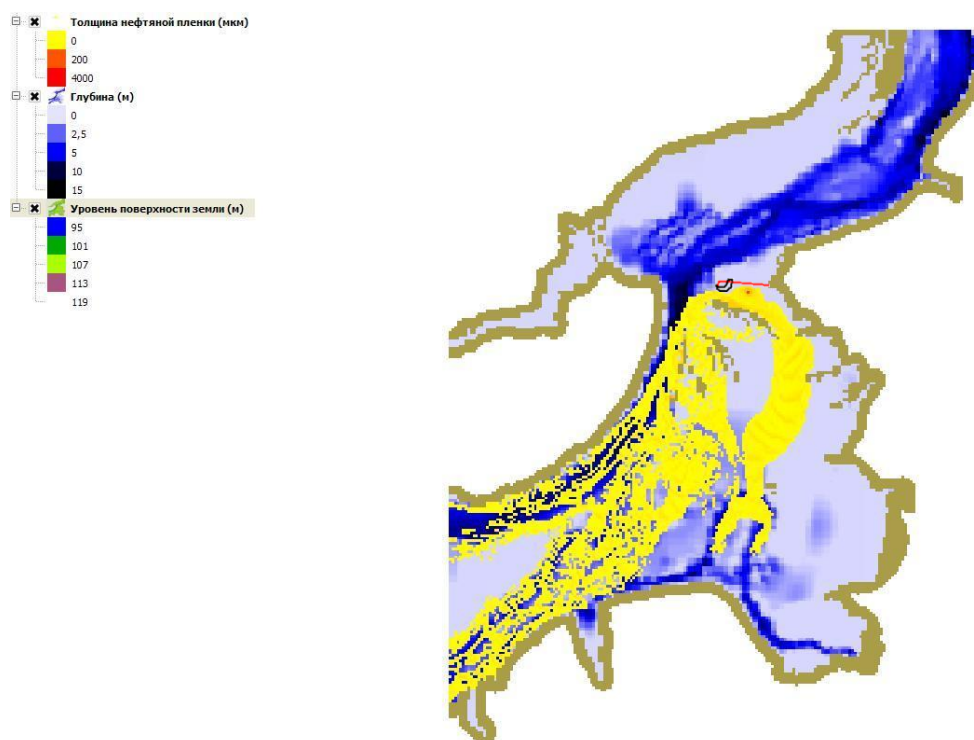


Рис. 9. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 14 суток после начала разлива, сценарий 3 (толщина нефтяной пленки)

Fig. 9. Spread of contamination zone at the design site 14 days after spill onset, scenario 1 (oil film thickness)

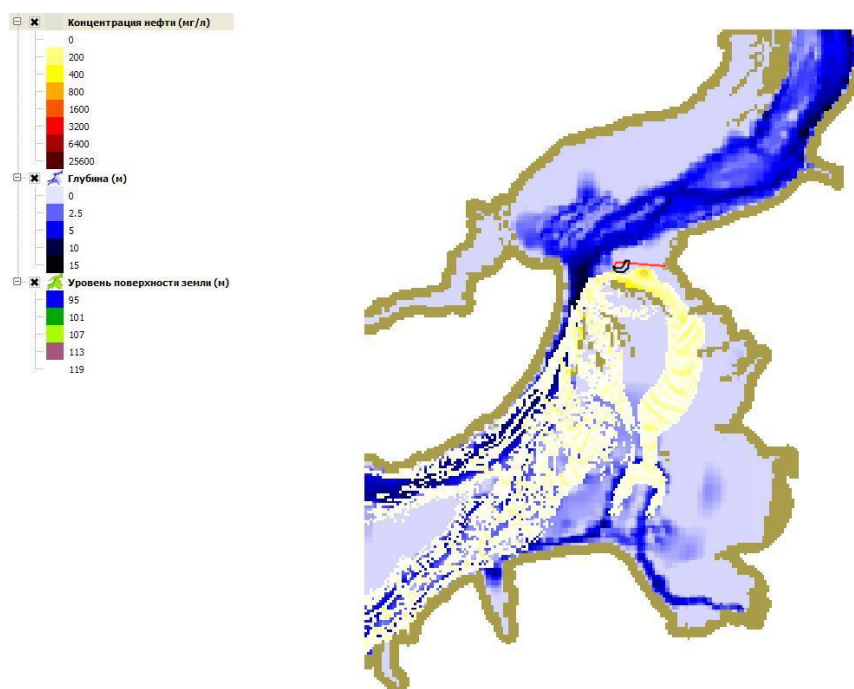


Рис. 10. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 14 суток после начала разлива, сценарий 3 (концентрация нефтепродуктов)

Fig. 10. Spread of contamination zone at the design site 14 days after spill onset, scenario 3 (concentration of petroleum products)

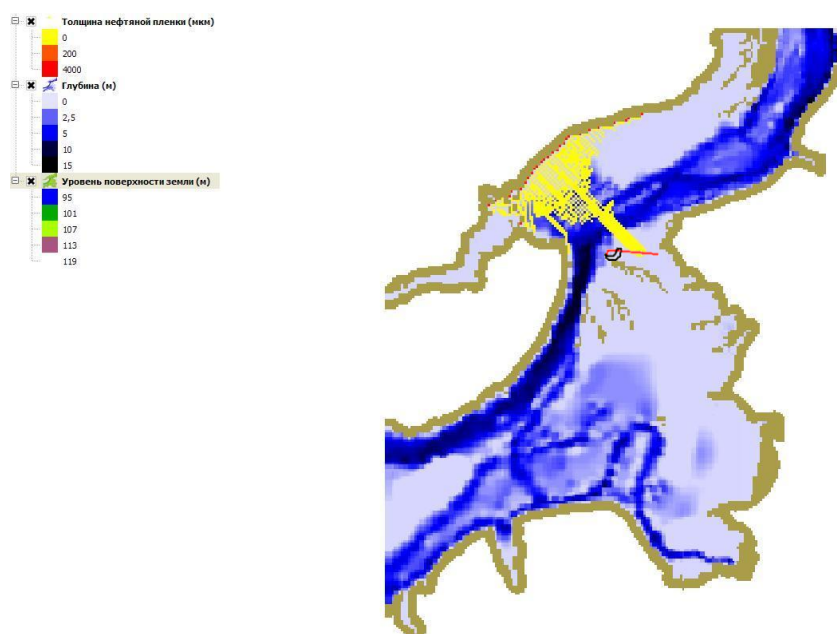


Рис. 11. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 14 суток после начала разлива, сценарий 4 (толщина нефтяной пленки)

Fig. 11. Spread of contamination zone at the design site 14 days after spill onset, scenario 4 (oil film thickness)

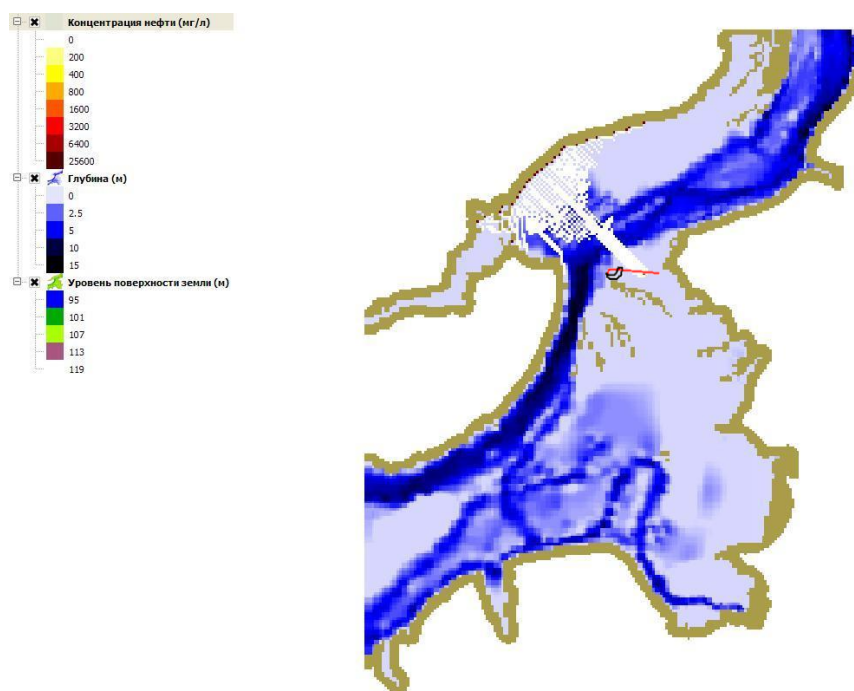


Рис. 12. Распространение зоны загрязнения на расчётном участке через 14 суток после начала разлива, сценарий 4 (концентрация нефтепродуктов)

Fig. 12. Spread of contamination zone at the design site 14 days after spill onset, scenario 4 (concentration of petroleum products)

По результатам расчетов можно заключить, что ветровые нагрузки будут оказывать преобладающее действие на динамику распространения пятна нефтяного загрязнения на мелководных участках. При ветрах ЮВ направления нефтяное пятно переносится и концентрируется у противоположного берега. Однако самое большое распространение загрязнения нефтепродуктами происходит при длительном выбросе и безветренной погоде. При выходе пятна на глубоководную часть (затопленное русло р. Камы) оно будет смываться вниз по течению на расстояния более 6 км (далее н.п. Огурдино на 5–6 км).

Заключение

В результате проведенных численных исследований дан прогноз нефтяного загрязнения Камского водохранилища при четырех сценариях аварийной ситуации. В случае аварийных разливов нефти наиболее неблагоприятные условия формируются в штилевую погоду, когда при длительном истекании нефти с малым расходом будет происходить ее вынос в основное русло. В этом случае пятно нефти будет медленно сползать по мелководному участку на юг на расстояние более 6 км; размеры нефтяного пятна на поверхности водохранилища могут достичь площади 17.5 км².

При длительных ветрах юго-восточного направления при малом истечении нефти возможен вынос пятна загрязнителя на противоположную сторону водохранилища, на мелководье.

Размеры нефтяного пятна в этом случае незначительны (0.375 км^2), а толщина пленки высокой, до 0.5 мм и более.

В случае аварийных разливов нефти при ветрах юго-восточной четверти и кратковременном интенсивном истечении нефтепродуктов также происходит вынос загрязняющих веществ на противоположную сторону водохранилища с формированием пятна относительно небольшой площади. Однако концентрация загрязняющих веществ у берега будет весьма значительной.

При штилевой погоде в случае интенсивного, но кратковременного разлива нефти пятно загрязнителя будет медленно сползать по мелководному участку на юг, площадь пятна составит 1.32 км^2 . При малых скоростях течения расположение площадки на затопленной пойме в тылу островов при кратковременном истекании нефти позволяет локализовать аварию, не допуская попадания загрязняющих веществ в русло.

Предложенный подход к оценке последствий аварии при эксплуатации скважин на акватории крупного водного объекта позволяет рассчитать размеры и положение нефтяного пятна при различных сценариях метеообстановки и принять научно обоснованные инженерные решения по устранению загрязнения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

Список литературы

Атлас единой глубоководной системы европейской части РФ. Т. 9. Ч 1. Река Кама от поселка Керчевский до города Чайковский: Составлен по данным на начало навигации 2000 г. СПб.: М-во транспорта РФ, Речфлот, 2000. 1 атл. (29 с., 23 л.): текст, табл., граф., указ. (ок. 700 назв.); 34x38 см.

Двинских С.А., Китаев А.Б. Гидрология Камских водохранилищ. Пермь: ПГУ, 2008. 266 с.

Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б. Моделирование процесса затопления пойменных территорий для участков крупных рек со сложной морфометрией русла и поймы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 17–31.

Катастрофа в Норильске 2020: разлив нефтепродуктов [Электронный ресурс]. URL: <https://ecoportal.info/katastrofa-v-arktike-razliv-nefteproduktov-v-norilske/> (дата обращения 01.11.22).

Китаев А.Б., Клименко Д.Е., Ларченко О.В. Скоростной режим района переменного подпора Камского водохранилища и его возможные изменения в связи с созданием хозяйственного объекта // Географический вестник. 2010. № 4(15). С. 52–63.

Лепихин А.П., Мирошниченко С.А., Богомолов А.В. Особенности влияния объектов нефтедобычи на экологическое состояние озера Нюхти // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2009. № 7. С. 76–98.

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты решения // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 16–32.

Математическое моделирование распространения разлива дизельного топлива из резервуара хранения резервного топлива ТЭЦ-3 ОАО «НТЭК» 29 мая 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: http://wwf.ru/upload/iblock/...GOIN_modelirovanie-2...2020.pdf/ (дата обращения 27.10.22).

Месторождение им. Сухарева [Электронный ресурс]. URL: <https://a-economics.ru/news/theme-withoutheme/code-780/> (дата обращения 01.11.22).

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Бассейн р. Камы. Т.1, Вып. 25. Гидрометеиздат, 1988. 707 с.

Прокофьев В.А. Численная плановая модель открытого потока при наличии на дне препятствий // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 3. С. 282–294.

Пьянков С.В., Калинин В.Г. ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере Камских). Пермь: Изд-во Алекс-Пресс, 2011. 158 с.

Храпов С.С., Хоперсков А.В., Кузьмин Н.М., Писарев А.В., Кобелев И.А. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH–TVD подхода // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 282–297.

Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // Journal of Computational Physics. 2022. Vol. 450. P. 110801. doi: 10.1016/j.jcp.2021.110801

Bezmaternykh D.M., Puzanov A.V., Kotovshchikov A.V., Drobotov A.V., Tolomeev A.P. Hydrochemical Indicators of Water Quality in the Norilsk–Pyasino Lake–River System after a Diesel Fuel Spill at Norilsk Heat and Power Plant 3 in 2020 // *Contemporary Problems of Ecology*. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 323–334. doi: 10.1134/S1995425521040028

Cnen Hai-zhou, Li Da-ming, Li Xiao Mathematical modeling of oil spill on the sea and application of modeling in Daya Bay // *Journal of Hydrodynamics*. Ser. B. 2007. Vol. 19(3). P. 282–291. doi: 10.1016/S1001-6058(07)60060-2

Delft-3D FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.33641, 28 April 2014. Delft The Netherlands: Deltares, 2014. 684 p.

MIKE 21C-2D river hydraulics and morphology. URL: <http://www.dhisoftware.com/Products/WaterResources/MIKE21C.aspx>.

Paladino E.E., Maliska C.R. Mathematical modeling and numerical simulation of oil spill trajectories on the sea // *Computational Fluid Dynamics Laboratory. SINMEC*. Federal University of Santa Catarina 88040-900. Florianopolis. SC. BRAZIL. 1995. P. 1–9.

Zafirakou A. Oil Spill Dispersion Forecasting Models. In *Monitoring of Marine Pollution*. IntechOpen: London, UK 2018. 20 p. doi: 10.5772/intechopen.81764

Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G. Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. Vol. 9 (2). P. 181. doi: 10.3390/jmse9020181

Wekpe V., Whitworth M., Baily B. A Critical Review of Oil Spill Data and Spill Management in the Niger Delta Region of Nigeria // *G- J. Environ. Sci. Technol.* 2022. Vol. 10(1). P.1–13.

References

Atlas yedinyoy glubokovolnoy sistemy yevropeyskoy chasti RF, Tom 9. Chast 1. R. Kama [Atlas of the Unified Deep-water system of the European part of the Russian Federation, Volume 9. Part 1, Kama River]. Rosrechflot. 2000. (In Russian).

Dvinskikh S.A., Kitaev A.B. *Gidrologiya Kamskikh vodokhranilishch* [Hydrology of the Kama reservoirs]. Perm: PGU, 2008. 266 p. (In Russian).

Zinoviev A.T., Koshelev K.B. Modelirovanie protsessa zatopleniya poymennykh territoriy dlya uchstkov krupnykh rek so slozhnoy morfometriy rusla i poymu [Modeling of flooding of floodplain territories for sections of large rivers with complex morphometry of the riverbed and floodplain] // *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemu, tekhnologii, upravleniye* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2013. Vol. 6. P. 17–31. (In Russian).

Katastrofa v Norilske 2020: razliv nefteproduktov [Disaster in Norilsk (2020): oil spill]. URL: <https://ecoportal.info/katastrofa-v-arktike-razliv-nefteproduktov-v-norilske/> (accessed: 01.11.22).

Kitaev A.B., Klimenko D.E., Larchenko O.V. Skorostnoy rezhim rayona peremennogo podpora Kamskogo vodokhranilishcha i ego vozmozhnye izmeneniya v svyazi s sozdaniem khozyaystvennogo obyektu [High-speed mode of area variable backwater of Kama water basins and its possible changes in connection with creation of economic object] // Geograficheskiy vetstnik [Geographical bulletin]. 2010. Vol. 4(15). P. 52–63. (In Russian).

Lepikhin A.P., Miroshnichenko S.A., Bogomolov A.V. Osobennosti vliyaniya obyektov neftedobychi na ekologicheskoye sostoyaniye ozera Nyukhni [Features of the influence of oil production facilities on the ecological state of Lake Nyukhti] // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemu, tekhnologii, upravleniye [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2009. Vol. 7. P. 76–98. (In Russian).

Lepikhin A.P., Lyubimova T.M., Lyakhin Yu.S., Tiunov A.A., Bogomolov A.V., Perepelitsa D.I., Parshokova Ya.N. Gidrodinamicheskoye modelirovaniye reki Vyatka v srednem tekhnii: postanovka zadachi, rezultaty resheniya // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemu, tekhnologii, upravleniye [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2013. Vol. 3. P. 16–32. (In Russian).

Matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya razliva dizelnogo topliva iz rezervuara khraneniya rezervnogo topliva TETS-3 OAO “NTEK” 29 maya 2020 g. [Mathematical modeling of spread of diesel fuel spilled from the storage tank of reserve fuel at HES-3 "NTEK" on May 29, 2020]. URL: http://wwf.ru/upload/iblock/...GOIN_modelirovaniye-2...2020.pdf/ (accessed: 27.10.22).

Mestorozhdeniye im. Sukhareva [Sukharev Field]. URL: <https://a-economics.ru/news/theme-withouttheme/code-780/> (accessed: 01.11.22).

Mnogoletniye dannyye o regime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. Basseyn r. Kama [Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Kama River basin]. Vol.1, no. 25. Gidrometeoizdat, 1988. 707 p. (In Russian).

Prokofiev V.A. Chislennaya planovaya model otkrytogo potoka pri nalichii na dne prepyatstviy [The numerical plan model of open stream at bottom obstacles] // Vodnye resursy [Water resources]. 2005. Vol. 32, no 3. P. 282–294. (In Russian).

Pyankov S.V., Kalinin V.G. GIS i matematiko-kartograficheskoye modelirovaniye pri issledovanii vodokhranilishch (na primere Kamsikh) [GIS and mathematical-cartographic modeling in the study of reservoirs (on the example of the Kama)]. Perm: Alex-Press, 2011. 158 p. (In Russian).

Khrapov S.S., Khopeskov A.V., Kuzmin N.M., Pisarev A.V., Kobelev I.A. Chislennaya shema dlya modelirovaniya dinamiki poverkhnostnykh vod na osnove kombinirovannogo

SPH-TVD podkhoda [Numerical scheme for modeling surface water dynamics based on the combined SPH–TVD approach] // Vychislitelnye metody i programmirovaniye [Computational methods and programming]. 2011. Vol. 12. P. 282–297. (In Russian).

Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // Journal of Computational Physics. 2022. Vol. 450. P. 110801. doi: 10.1016/j.jcp.2021.110801

Bezmaternykh D.M., Puzanov A.V., Kotovshchikov A.V., Drobotov A.V., Tolomeev A.P. Hydrochemical Indicators of Water Quality in the Norilsk–Pyasino Lake–River System after a Diesel Fuel Spill at Norilsk Heat and Power Plant 3 in 2020 // Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 323–334. doi: 10.1134/S1995425521040028

Cnen Hai-zhou, Li Da-ming, Li Xiao Mathematical modeling of oil spill on the sea and application of modeling in Daya Bay // Journal of Hydrodynamics. Ser. B. 2007. Vol. 19(3). P. 282–291. doi: 10.1016/S1001-6058(07)60060-2

Delft-3D FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.33641, 28 April 2014. Delft The Netherlands: Deltares, 2014. 684 p.

MIKE 21C-2D river hydraulics and morphology. URL: <http://www.dhisoftware.com/Products/WaterResources/MIKE21C.aspx>.

Paladino E.E., Maliska C.R. Mathematical modeling and numerical simulation of oil spill trajectories on the sea // Computational Fluid Dynamics Laboratory. SINMEC. Federal University of Santa Catarina 88040-900. Florianopolis. SC. BRAZIL. 1995. P. 1–9.

Zafirakou A. Oil Spill Dispersion Forecasting Models. In Monitoring of Marine Pollution. IntechOpen: London, UK 2018. 20 p. doi: 10.5772/intechopen.81764

Keramea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G. Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges // J. Mar. Sci. Eng. 2021. Vol. 9 (2). P. 181. doi: 10.3390/jmse9020181

Wekpe V., Whitworth M., Baily B. A Critical Review of Oil Spill Data and Spill Management in the Niger Delta Region of Nigeria // G- J. Environ. Sci. Technol. 2022. Vol. 10(1). P. 1–13.

MODELING OF OIL POLLUTION OF A LARGE PLAIN RESERVOIR

A.T. Zinoviev¹, K.B. Koshelev¹, S.A. Dvinckikh²

¹*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,*

²*Perm State National Research University, Perm,*

E-mail: zinoviev@iwep.ru, koshelev@iwep.ru, dvins@mail.ru

To assess oil pollution impacts on the aquatic environment when exploiting nested wells, a computer model of oil spill spread in the waters of a large plain reservoir located near the production site was built. Several scenarios of probable occurrence of emergency situations with different weather conditions were considered, their numerical calculations performed, and computation results of simulated emergency situations discussed. It has been established that the size and position of an oil slick depend not only on the duration of the oil spill and its discharge rate, but also on the direction of the wind. It is shown that there are conditions under which an oil slick can get into the main channel of the reservoir.

Key words: reservoir; exploration wells; emergency; oil pollution; computer simulation.

Received October 5, 2022

Сведения об авторах

Зиновьев Александр Тимофеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. ORCID: 0000-0003-4973-2803. E-mail: zinoviev@iwep.ru.

Кошелев Константин Борисович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1, ИВЭП СО РАН. ORCID: 0000-0002-7124-3945. E-mail: koshelev@iwep.ru.

Двинских Светлана Александровна – доктор географических наук, профессор Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ). Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. ORCID: 0000-0002-8443-8100. E-mail: dvis@mail.ru.

Information about the authors

Zinoviev Aleksandr Timofeevich – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-4973-2803. E-mail: zinoviev@iwep.ru.

Koshelev Konstantin Borisovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-7124-3945. E-mail: koshelev@iwep.ru.

Dvinckikh Svetlana Aleksandrovna - Doctor of Geographical Sciences, Professor of Perm State National Research University (PSNRU). 1, Bukireva St., 614068 Perm, Russia. ORCID: 0000-0002-8443-8100. E-mail: dvins@mail.ru.