УДК 504.4.054

Абрецова Елена Сергеевна, магистрант
(КузГТУ, г. Кемерово)
Голубева Алина Константиновна, магистрант
Горошко Сергей Дмитриевич, магистрант
Коробейников Илья Алексеевич, магистрант
(ДВФУ, г. Владивосток)

Elena S. Abretcova, undergraduate
(KuzSTU, Kemerovo)
Alina Konstantinovna Golubeva, undergraduate
Sergey Dmitrievich Goroshko, undergraduate
Ilya Alekseevich Korobeinikov, undergraduate
(FEFU, Vladivostok)

ПРИОРИТИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ВОДОТОКОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВАХ НЕФТИ С УЧЁТОМ ВРЕМЕНИ РАЗВЁРТЫВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ СРЕДСТВ

PRIORITIZATION OF WATERCOURSE PROTECTION DURING ACCIDENTAL OIL SPILLS CONSIDERING THE DEPLOYMENT TIME OF RESPONSE EQUIPMENT

Аннотация. В статье предложен алгоритм приоритизации защиты водотоков по экологической значимости, времени готовности рубежей и запасу ресурсов, на модельных данных определены критические задержки реагирования и изменения оптимального размещения защитных средств.

Abstract. The article proposes an algorithm for prioritizing the protection of watercourses based on their ecological significance, the time required to establish protective barriers, and available resource reserves. Using model data, critical response delays and changes in the optimal allocation of protective equipment are identified.

Введение

Если при аварии нефть попадает в речную сеть, её поверхностная фракция быстро переносится вниз по течению, времени на локализацию остаётся мало, а экологически уязвимые участки расположены неравномерно. Даже наличие боновых заграждений и подготовленных аварийных формирований не гарантирует успеха первых действий, многое зависит от количества оборудования и от того, успеют ли его доставить и развернуть до подхода нефтяного загрязнения, особенно остро проблема проявляется в

бассейнах с разветвлённой гидрографической сетью, ограниченным доступом по дорогам и несколькими объектами экологического приоритета.

Российские Правила организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов предусматривают планирование таких действий [1]. Руководство Ростехнадзора, утверждённое приказом от 10.04.2025 № 135, рекомендует при выборе рубежей задержания оценивать время движения нефтяного пятна и развёртывания бонов, также следует учитывать состояние подъездных путей и доступность береговой линии [2].

При планировании защиты учитывают экологическую чувствительность береговых участков, биологические ресурсы и водопользование, такой подход изложен в методических принципах Environmental Sensitivity Index (ESI), разработанных NOAA главным образом для прибрежных территорий. Для внутренних водотоков эти принципы нужно адаптировать [3].

Также созданы модели распространения нефтяного загрязнения в речных бассейнах и оценки силы его воздействия [4]. Исследования 2026 года показывают, что результат работы боновых заграждений зависит от гидрологических условий [5]. В этой работе будет проверено, как совместный учёт экологической значимости, временного резерва и ограничений по оснащению влияет на выбор рубежей, если сравнить его с ранжированием, основанным только на экологической ценности.

Цель исследования состоит в разработке алгоритма, который помогает расставлять приоритеты при защите водотоков, когда аварийные ресурсы ограничены, и в проверке этого алгоритма на модельных сценариях.

Материалы и методы

Предлагаемая схема включает четыре этапа: выявить экологически значимые участки; оценить, сколько времени понадобится фронту нефтяного загрязнения, чтобы дойти до рубежей, и проверить, готовы ли они; исключить варианты, которые не подходят по срокам и технологическим условиям; выбрать сочетание допустимых рубежей с наибольшей суммарной приоритетной ценностью, учитывая ограничения по ресурсам. Для сравнения вариантов используют нормированную оценку значимости E_i от 0 до 1. , её рассчитывают по трём отдельным критериям: сохранности биоты и местообитаний (S_{1i}), значимости водозаборов и водоохранных функций (S_{2i}), хозяйственного и рекреационного использования (S_{3i}), значения определяют по картографическим и экологическим данным, в этой схеме они заданы условно, веса 0,5; 0,3; 0,2 указаны для демонстрации.

Экологическую значимость рассчитывают, как взвешенную сумму отдельных критериев по формуле 1:

$$E_i = 0{,}5 \cdot S_{1i} + 0{,}3 \cdot S_{2i} + 0{,}2 \cdot S_{3i} \quad (1)$$

Например, при значениях $S_1 = 1{,}0$; $S_2 = 0{,}9$ и $S_3 = 0{,}9$ дают E составит 0,95, такая свёртка отражает только порядок предпочтений с учётом выбранных весов и не предназначена для нормативной оценки вреда, для предварительного расчёта в упрощённом виде время подхода поверхностной фракции нефти к i-му рубежу определяют по формуле 2:

$$t_{\text{подх},i} = \frac{L_i}{60 \cdot u_i} \quad (2)$$

где L_i – протяжённость пути переноса, м;

u_i – принятая средняя скорость поступательного движения переднего края загрязнения, м/с;

$t_{\text{подх,i}}$ – время, мин.

При практическом применении скорость переноса нужно уточнять по гидрологическим измерениям или с помощью специализированной модели, нефтяное пятно движется со скоростью, которая отличается от скорости потока, а на его движение влияют свойства нефти, ветер, геометрия русла и взаимодействие с берегами [4].

Полное время готовности i-го рубежа, отсчитываемое с момента разлива, в консервативной схеме с последовательным выполнением операций рассчитывается как сумма организационно-технологических составляющих по формуле 3:

$$t_{\text{гот},i} = t_{\text{обн}} + t_{\text{моб}} + t_{\text{дост},i} + t_{\text{разв},i} \quad (3)$$

где $t_{\text{обн}}$ – время до обнаружения разлива и передачи достоверной информации;

$t_{\text{моб}}$ – время, необходимое для мобилизации сил;

$t_{\text{дост,i}}$ – время, необходимое для доставки оборудования;

$t_{\text{разв,i}}$ – монтаж и проверка работоспособности защитного рубежа.

Временной резерв выражается разностью с помощью формулы 4:

$$\Delta t_i = t_{\text{подх},i} - t_{\text{гот},i} \quad (4)$$

Рубеж считают своевременно реализуемым при условии $\Delta t_i \geq \tau$, здесь τ означает дополнительный резерв безопасности, который принимают при сценарном расчёте. Для локализации одного соблюдения временного условия мало, нужны доступ к берегу, технически пригодная площадка и средства сбора, также важно, чтобы течение относительно бона было безопасным, а крепления прошли проверку. Согласно данным, для обычных бонов ориентировочный предел нормальной скорости составляет около 0,7 узла (0,36 м/с) [6], если условно принять угол 30° к потоку и скорость до 0,60 м/с, нормальная составляющая составит 0,30 м/с., реальные рабочие пределы

определяют с учётом характеристик оборудования и условий установки [5, 6].

Для множества допустимых рубежей вводят двоичную переменную x_i. Значение 1 означает, что выделяют отдельную бригаду и нужный комплект оборудования, при значении 0 от первоочередного развёртывания отказываются, в упрощённой задаче целочисленной оптимизации выбирают сочетание участков (формула 5):

$$W = \Sigma(E_i \cdot x_i) \rightarrow max \quad (5)$$

при ограничениях:

$$x_i \leq N; \quad \Sigma(b_i \cdot x_i) \leq B; \quad x_i = 0 \text{ при } \Delta t_i < \tau$$

где W – сумма приоритетных ценностей;

N – число независимых аварийных бригад;

b_i – необходимая длина бонового заграждения на i-м рубеже, м;

B – доступный суммарный запас бонов, м.

Показатель W не показывает, насколько удалось предотвратить экологический ущерб, и не отражает долю собранной нефти, он нужен, чтобы сравнивать варианты в рамках выбранного сценария, похожие подходы к многокритериальной оптимизации используют в современных исследованиях аварийного реагирования, для речной сети их нужно описать отдельно, с учётом пространственного расположения [7].

Постановка расчётного эксперимента

Для проверки алгоритма смоделировали искусственный сценарий: нефть одновременно поступает по четырём гидравлически обособленным ветвям условной водосборной сети, например, так может происходить, если аварийный сток распределяется по нескольким направлениям, на каждой ветви перед отдельным экологически значимым объектом размещён один защитный рубеж. Согласно условиям сценария, достижение рубежа и защита объекта не меняют нагрузку на другие ветви, поэтому каждый защищаемый объект учитывается один раз, расчёт выполнен для безледового периода, все числа в таблице 1 и полученные результаты условны, они не относятся к конкретной аварии, реальной речной сети или эффективности заграждений, которые используются на практике.

Таблица 1 – Исходные параметры условных защитных рубежей

Рубеж	***L*, м**	***u*, м/с**	**Доставка, мин**	**Боны, м**	E_i
А	1 500	0,50	20	40	1,00
Б	2 200	0,40	25	55	0,95
В	3 000	0,50	30	50	0,80
Г	4 000	0,50	40	60	0,65

Для каждого рубежа в расчёте заданы $t_{обн}$ = 20 мин и $t_{моб}$ = 15 минут, развёртывание занимает 15 минут на участке А, на участках Б, В и Г на это отводится по 20 мин. Есть N = 2 бригады и В = 110 м боновых заграждений. В качестве сценарного допущения предусмотрен дополнительный резерв безопасности τ = 5 минут, считается, что технологическую пригодность рубежей проверили заранее, подъезды доступны, средств для сбора хватает, в этом примере не рассматриваются прорыв бонов и повторная мобилизация бригады. На каждой выбранной позиции работает отдельная бригада, реальную пригодность нужно подтвердить инженерной проверкой, расчётные показатели собраны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта временной реализуемости

Рубеж	**Подход нефти, мин**	**Готовность, мин**	**Резерв, мин**	**Условие $\Delta t \geq 5$**
А	50,0	70	−20,0	нет
Б	91,7	80	+11,7	да
В	100,0	85	+15,0	да
Г	133,3	95	+38,3	да

Результаты и обсуждение

Рубеж А обладает наибольшей экологической ценностью (E = 1,00), но своевременно защитить его не удаётся: на подготовку нужно на 20 мин больше, чем остаётся до подхода нефти, если выбрать два участка с максимальными значениями E_i без проверки сроков, в набор попадут А и Б, для них потребуется 95 м бонов, вовремя защитить получится только Б, поэтому реализуемый приоритет составит 0,95 вместо 1,75, потеря равна 0,80 условной единицы, или 45,7% результата оптимизации, среди остальных участков наибольшую сумму приоритетных ценностей даёт пара Б + В: W = 1,75, для неё нужно 105 м бонов, на пару Б + Г потребуется 115 м, это больше доступного запаса, вариант В + Г укладывается в лимит и требует 110 м, но его значение W ниже, всего 1,45.

Для проверки чувствительности решения рассмотрели несколько дополнительных сценариев, в первом время обнаружения увеличили на 10 мин, во втором на 20 мин, в третьем расчётную скорость переноса нефтяного загрязнения повысили на 20%, сохранив прежнее время реагирования, в четвёртом запас бонов сократили до 100 м, для каждого сценария допустимые варианты перебрали заново, результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оптимальное распределение ресурсов при изменении условий

Сценарий	**Выбраны рубежи**	***W***	**Изменение *W*, %**
Исходный	Б + В	1,75	0
Обнаружение позже на 10 мин	В + Г	1,45	−17,1
Обнаружение позже на 20 мин	Г	0,65	−62,9
Скорость переноса выше на 20%	Г	0,65	−62,9
Доступно только 100 м бонов	Б	0,95	−45,7

Если обнаружение задерживается на 10 минут, резерв участка Б падает до 1,7 минуты, то есть оказывается ниже принятого порога, участки В и Г сохраняют реализуемость и вместе составляют оптимальную пару, при задержке в 20 минут участок В уже не входит в множество допустимых рубежей. В этом случае остаётся только участок Г., похожий результат даёт увеличение скорости переноса на 20 процентов расчётное время подхода загрязнения к рубежу Б сокращается до 76,4 минуты, а к рубежу В оно составляет 83,3 минуты, оба показателя ниже необходимого времени готовности, а у участка Г резерв сохраняется на уровне 16,1 минуты.

Для определения граничных временных условий введена максимально допустимая дополнительная задержка готовности рубежа (формула 6):

$$\delta_{\text{кр},i} = \Delta t_i - \tau \quad (6)$$

По формуле (7) критическая дополнительная задержка для рубежа Б равна 6,7 минут, для рубежа В - 10,0 мин, для Г достигает 33,3 мин, при δ = 10 мин рубеж В всё ещё соответствует принятому условию $\Delta t \geq \tau$, эти пороги позволяют понять, когда уже пора пересмотреть план распределения ресурсов, не дожидаясь полного исчерпания временного резерва.

Полученные различия имеют принципиальное значение, при задержке в десять минут W снижается на 17,1%, но сама по себе эта цифра не означает, что реальный экологический ущерб увеличится на 17,1%, она отражает только изменение суммы выбранных нормированных приоритетов.

Процедуру стоит применять ещё до аварии, в плановой документации нужно заранее зафиксировать перечень потенциальных рубежей, требуемую длину бонов, состояние подъездных путей и время монтажных операций, затем эти данные следует проверять на учениях. Предложенный подход может служить расчётным инструментом при оперативном руководстве ликвидацией разлива.

У модели есть ограничения, в ней ветви считаются независимыми, веса экологических критериев задаются заранее, скорость переноса принимается постоянной, время готовности тоже считается неизменным. Чувствительность решения к субъективным весам экологической оценки и вероятности отказа заграждений пока не исследовали, для реальной реки в задачу нужно включить, вероятность прорыва заграждений и ожидаемый остаточный объём нефти, на сложных руслах применять гидродинамическое моделирование и интервальные оценки времени подхода, при сильном течении нужно проверять допустимый угол и тип заграждений [5, 6].

Заключение

На условном расчётном сценарии проверили, как работает процедура приоритизации защиты водотоков, при расчёте учитывали нормированную

экологическую значимость, время готовности рубежей, количество бригад и доступную длину бонов, по результатам можно определить, какие варианты допустимы по времени до распределения ресурсов, и рассчитать пороговые задержки реагирования.

Расчёты показали, насколько выбор зависит от временных параметров и ограничений по оснащению, результаты носят методический характер, по предложенной процедуре нельзя численно оценить реальный предотвращённый ущерб без полевых и гидрологических данных.

Список литературы

1. Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации: постановление Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 № 2451 (ред. от 02.06.2026). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373619/ (дата обращения: 23.10.2026).

2. Об утверждении руководства по безопасности «Инструкция по ликвидации возможных аварий на подводных переходах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов»: приказ Ростехнадзора от 10.04.2025 № 135. URL: https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-10042025-n-135-ob/rukovodstvo-po-bezopasnosti-instruktsiia-po/vii/ (дата обращения: 23.10.2026).

3. White M., Boring C., Horsman J. et al. Environmental Sensitivity Index Guidelines. Version 5.0. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R 57. 2026. DOI: 10.25923/fkqy-1m49. URL: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/72850 (дата обращения: 23.10.2026).

4. Wang J., Wang S., Zhu Z. et al. Integrated framework for assessing the impact of inland oil spills on a river basin: Model and case study in China // Ecological Indicators. 2024. Vol. 158. Art. 111576. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111576.

5. Meng W., Wang S., Yang Y., Zhang Q., Jin L. Modeling the deployment of oil containment booms under seasonal hydrological conditions for inland water systems emergency response // Engineering Research Express. 2026. Vol. 8. Art. 075102. DOI: 10.1088/2631-8695/ae5600.

6. ITOPF. Containment & Recovery. URL: https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/containment-recovery/ (дата обращения: 23.10.2026).

7. Ye X., Zhang B., Lee K. et al. A multi-criteria simulation-optimization coupling approach for effective emergency response in marine oil spill acci-dents // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 469. Art. 133832. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133832.