

УДК 656.6

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РАЗЛИВОВ

Вилявина Софья Александровна¹, студент, лаборант отдела научных исследований и цифровизации

e-mail: sofi.vilyavina@yandex.ru

Головацкая Леся Ивановна¹, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины», начальник отдела научных исследований и цифровизации

e-mail: li_golova@mail.ru

¹ Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина – Астраханский филиал Волжского государственного университета водного транспорта, Астрахань, Россия

Аннотация. Статья содержит аналитический обзор программных средств поддержки принятия решений при аварийных разливах углеводородов в море. Исследуются возможности и ограничения систем SPILLMOD, PISCES 2, OILMAP и WebGNOME/ADIOS, включая сравнительный анализ прогнозной точности. Рассмотрены перспективы внедрения технологий искусственного интеллекта. Отдельно аргументируется важность развития отечественного ПО для обеспечения экологической безопасности РФ.

Ключевые слова: разливы нефти, поддержка принятия решений, математическое моделирование, SPILLMOD, OILMAP, WebGNOME, ликвидация аварийных разливов, экологическая безопасность.

ANALYSIS OF PROGRAM COMPLEXES AND TOOLS FOR SUPPORTING DECISION-MAKING IN THE ELIMINATION OF HYDROCARBON SPILLS

Sofia A. Vilyavina¹, Student, Laboratory Assistant in the Department of Research and Digitalization

e-mail: sofi.vilyavina@yandex.ru

Lesya I. Golovatskaya¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mathematical and Natural Sciences, Head of the Department of Scientific Research and Digitalization

e-mail: li_golova@mail.ru

¹ Caspian Institute of Sea and River Transport named after Admiral F.M. Apraksin – Astrakhan branch of Volga State University of Water Transport, Astrakhan, Russia

Abstract. The article provides an analytical review of software tools for supporting decision-making in the event of accidental hydrocarbon spills at sea. The capabilities and limitations of the SPILLMOD, PISCES 2, OILMAP, and WebGNOME/ADIOS systems are explored, including a comparative analysis of their predictive accuracy. The article also discusses the prospects for the implementation of artificial intelligence technologies. The importance of developing domestic software for ensuring the environmental safety of the Russian Federation is emphasized.

Keywords: oil spills, decision support, mathematical modeling, SPILLMOD, OILMAP, WebGNOME, emergency spill response, environmental safety.

Аварийные разливы углеводородов при их добыче, транспортировке и переработке представляют собой один из наиболее серьезных вызовов для морских и прибрежных экосистем. Масштаб последствий таких инцидентов — от разлива танкера Эксон Вальдез до аварии на платформе Deepwater Horizon — наглядно демонстрирует критическую важность оперативного и научно обоснованного реагирования [1]. В условиях ограниченного времени на принятие решений и высокой степени неопределенности относительно поведения нефтяного пятна, ключевую роль играют специализированные программные комплексы, реализующие математические модели переноса, растекания и выветривания нефти.

Современные системы поддержки принятия решений для ликвидации разливов представляют собой сложные программно-аппаратные платформы, интегрирующие гидродинамические модели акваторий, метеорологические прогнозы, базы данных физико-химических свойств углеводородов и геоинформационные системы. Их главная задача — предоставить координаторам аварийно-спасательных операций достоверный прогноз эволюции разлива и оценку эффективности различных стратегий реагирования.

Цель настоящей статьи является проведение комплексного анализа существующих программных комплексов и инструментальных средств поддержки принятия решений при ликвидации углеводородных разливов, выявление их сравнительных преимуществ и ограничений, а также определение перспективных направлений развития данной области в контексте российских реалий.

Программные комплексы для моделирования разливов нефти могут быть классифицированы по нескольким основаниям: по размерности моделей (двухмерные и трехмерные), по типу математического аппарата (лагранжевы, эйлеровы, гибридные), по масштабу решаемых задач (локальные, региональные, глобальные) и по целевому назначению (оперативное прогнозирование, стратегическое планирование, оценка рисков) [3-4].

Независимо от архитектурных особенностей, современная СППР для ликвидации разливов должна обеспечивать реализацию трех базовых функций [5]:

1. Прогноз траектории переноса нефтяного пятна под комбинированным воздействием ветра, течений и волнения.
2. Моделирование процессов выветривания — испарения, эмульгирования, естественного диспергирования, изменения плотности и вязкости.
3. Оценку эффективности сценариев реагирования — применения диспергентов, боновых заграждений, скиммеров.

Дополнительные модули могут включать расчет вероятностных зон поражения береговой линии, оценку ущерба биоресурсам и оптимизацию распределения сил и средств.

Зарубежные программные комплексы

Комплекс GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), разработанный Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA), исторически является одним из наиболее широко применяемых инструментов



оперативного прогнозирования. Изначально реализованный как приложение с ограниченными возможностями моделирования вертикальных перемещений нефти, он использовался в связке с автономным модулем расчета выветривания ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills).

Ключевым этапом эволюции комплекса стал переход к веб-ориентированной архитектуре WebGNOME, в рамках которой модули траекторного моделирования и расчета баланса нефти интегрированы в единую онлайн-платформу. Сравнительные исследования, выполненные на тестовом сценарии разлива в акватории Восточной Явы, демонстрируют, что WebGNOME обеспечивает более высокую точность прогноза бюджета разлива и параметров выветривания по сравнению с отдельным использованием GNOME и ADIOS. Важным дополнением стал калькулятор выбора мер реагирования (Response Options Calculator), позволяющий в оперативном режиме оценивать сравнительную эффективность различных стратегий [2]. Преимуществами являются открытый доступ, глобальная база гидродинамических данных, регулярное обновление алгоритмической базы. В качестве ограничений комплекса можно указать, что точность прогноза критически зависит от качества подключаемых сеточных данных о течениях, ограниченная применимость в ледовых условиях [1].

OILMAP (Oil Spill Prediction Modeling System) и PISCES 2 (Potential Incident Simulation, Control and Evaluation System) относятся к категории коммерческих профессиональных систем, широко используемых операторами морских терминалов и добывающих платформ.

Сравнительный анализ производительности этих двух комплексов, выполненный на основе сценариев разлива в заливе Мерсин (Турция), выявил существенные различия в результатах моделирования [6]. OILMAP прогнозирует статистически значимо большую площадь распространения пятна по сравнению с PISCES 2, что может интерпретироваться как более консервативная оценка риска. В части расчета скоростей испарения OILMAP продемонстрировал лучшее согласие с теоретическими моделями, принятыми в научной литературе, тогда как PISCES 2 показал систематическое занижение интенсивности испарительных процессов [6]. Обе системы обеспечили приемлемую надежность при оконтуривании зон потенциального риска, что позволяет использовать их для планирования расстановки сил и средств.

Вывод по сравнительному анализу: выбор между OILMAP и PISCES 2 должен определяться конкретными условиями эксплуатации и приоритетами пользователя — консервативность оценок площади поражения (OILMAP) или экономия ресурсов при планировании операций (PISCES 2).

Отечественные разработки

SPILLMOD, созданный специалистами Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН»), представляет собой наиболее проработанное отечественное решение в области моделирования морских разливов нефти [7-8]. Комплекс реализует оригинальную гидродинамическую модель эволюции нефтяного пятна, основанную на численном решении уравнений типа «мелкой воды» с использованием Эйлера-Лагранжева вычислительного метода.

Принципиальной отличительной особенностью SPILLMOD является возможность расчета поля толщины нефтяного загрязнения с учетом наличия контактных границ произвольной конфигурации при одновременном моделировании процессов растекания и выветривания [7]. При расчете испарения высоковязких типов нефти учитывается эффект демпфирования скорости испарения за счет молекулярной диффузии компонентов в жидкой фазе — фактор, который не учитывается в большинстве зарубежных аналогов. Моделирование естественного диспергирования осуществляется с учетом состояния



поверхности моря, экспериментальных данных о дроблении нефтяной пленки в слое волнового перемешивания и турбулентной диффузии в верхнем слое океана.

Практическая апробация SPILLMOD в условиях реальных аварийных разливов и на акваториях портовых комплексов подтвердила заявленные характеристики модели как инструмента информационной поддержки операций по ликвидации аварийных разливов нефти. Картографический модуль комплекса реализован на базе ГИС MapInfo, что обеспечивает совместимость с корпоративными геоинформационными системами [8].

В дополнение к SPILLMOD специалистами ГОИНа разработан программный комплекс «Статистика разливов», использующий архивную гидрометеорологическую информацию для вероятностного расчета зон риска распространения нефти и статистической оценки выветривания в зависимости от типа углеводородов и объемов аварийных сбросов. Такой подход позволяет перейти от детерминированного сценарного моделирования к вероятностной оценке рисков, что особенно востребовано при разработке планов ликвидации аварийных разливов (ПЛАРН) и деклараций промышленной безопасности [8].

Большинство оперативных СППР (OILMAP, GNOME, SPILLMOD) реализуют детерминированный подход, основанный на численном интегрировании уравнений гидродинамики с заданными начальными и граничными условиями. Такой подход обеспечивает высокую детализацию прогноза, но критически чувствителен к точности входных метеорологических и океанографических данных [3,9].

Альтернативой является вероятностный подход, реализованный в модуле «Статистика разливов» ГОИНа и ряде зарубежных систем оценки рисков. Он предполагает ансамблевое моделирование множества сценариев с варьированием входных параметров в пределах их климатической изменчивости, что позволяет получить вероятностное распределение зон поражения [2, 10].

В основе алгоритмов расчета траектории пятна большинство систем (GNOME, OILMAP) используют Лагранжев подход, при котором нефтяное пятно представляется ансамблем дискретных частиц, перемещающихся под действием течений и ветра с добавлением стохастической компоненты для учета турбулентной диффузии. Преимуществом метода является вычислительная эффективность и естественность описания адвективного переноса.

SPILLMOD реализует гибридный Эйлера-Лагранжев метод, позволяющий рассчитывать не только координаты пятна, но и поле толщины нефтяной пленки, что критически важно для оценки эффективности механического сбора и применения диспергентов [7].

Перспективным направлением развития СППР является интеграция методов машинного обучения для решения задач, плохо поддающихся формализации в рамках классических гидродинамических моделей. Обзор Yang et al. (2021) указывает на активное развитие гибридных интеллектуальных систем, объединяющих детерминированные модели с нейросетевыми алгоритмами для повышения точности краткосрочного прогноза и автоматической классификации нефтяных загрязнений по данным дистанционного зондирования.

В контексте геополитических ограничений и курса на технологический суверенитет критическое значение приобретает развитие отечественных программных комплексов. Опыт разработки SPILLMOD демонстрирует, что российские научные школы обладают необходимыми компетенциями для создания конкурентоспособных продуктов в данной области. Перспективным направлением является адаптация существующих моделей к специфическим условиям арктических морей — учет наличия ледового покрова, взаимодействия нефти со льдом, особенностей выветривания при низких температурах.

Переход к облачным архитектурам, подобно трансформации GNOME в WebGNOME, обеспечивает возможность оперативного доступа к вычислительным ресурсам

непосредственно из кризисных центров без необходимости развертывания специализированной ИТ-инфраструктуры [2, 11]. Для российской практики данное направление сопряжено с необходимостью обеспечения требований информационной безопасности объектов критической инфраструктуры.

Результаты анализа и сопоставления основных отечественных и зарубежных комплексов для моделирования разливов углеводородов систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ существующих программных комплексов и инструментальных средств поддержки принятия решений при ликвидации углеводородных разливов

Характеристика / Система	WebGNOME / ADIOS (США, NOAA)	OILMAP (Коммерческая)	PISCES 2 (Коммерческая)	SPILLMOD (Россия, ФГБУ «ГОИИ»)
Тип доступа	Открытый (веб-ориентированный)	Коммерческий (профессиональный)	Коммерческий (профессиональный)	Отечественная разработка
Математический аппарат	Лагранжев (ансамбль дискретных частиц)	Лагранжев	Лагранжев	Гибридный Эйлера-Лагранжев
Прогноз выветривания	Интегрированный модуль (ранее ADIOS). Высокая точность прогноза бюджета разлива.	Лучшее согласие с теорией по испарению	Систематическое занижение интенсивности испарения	Учет демпфирования испарения для высоковязкой нефти (молекулярная диффузия)
Оценка площади пятна	Зависит от качества сеточных данных	Консервативная (прогнозирует большую площадь)	Меньшая площадь по сравнению с OILMAP	Расчет поля толщины пленки (критично для оценки сбора нефти)
Уникальные особенности	Глобальная база данных течений, калькулятор выбора мер реагирования (ROC)	Надежное оконтуривание зон риска, планирование сил и средств	Приемлемая надежность рисков, экономия ресурсов при планировании	Моделирование контактных границ произвольной формы; учет ледовой обстановки (в перспективе)
Архитектура и ГИС	Онлайн-платформа (облачная архитектура)	Настольное ПО / Профессиональные модули	Настольное ПО / Профессиональные модули	Картографический модуль на базе ГИС MapInfo
Основные ограничения	Ограниченная применимость в ледовых условиях, чувствительность к входным данным	Консервативность оценок может вести к перерасходу ресурсов	Занижение испарения может влиять на расчет остаточного объема нефти	Требуется верификация для арктических морей, зависимость от национальной гидрометеорологии

Сравнение ведётся по ключевым параметрам: математический аппарат, точность прогноза процессов выветривания (например, испарения), оценка площади загрязнения и уникальные функциональные возможности. В мировой практике для моделирования распространения загрязнений применяются различные математические аппараты, в первую очередь Лагранжев и Эйлера-Лагранжев методы. Выбор конкретного подхода определяет точность и детализацию прогноза динамики нефтяного пятна. Сравнительный анализ показывает, что существующие методики могут как завышать, так и занижать темпы этих процессов, что требует их постоянной верификации и калибровки для конкретных типов углеводородов. Для эффективного планирования аварийно-спасательных операций недостаточно иметь лишь оценку площади загрязнения. Критически важным параметром является толщина нефтяной плёнки, так как именно она определяет объём разлитого вещества и тактику его сбора. Эффективность любой модели тесно связана с гидрометеорологическими данными и физико-химическими свойствами загрязнителя.

Универсальных решений не существует; для сложных условий, таких как ледовая обстановка или внутренние морские воды, требуется адаптация и верификация моделей.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует, что современный рынок программных комплексов поддержки принятия решений при ликвидации углеводородных разливов представлен широким спектром решений — от открытых платформ NOAA до коммерческих продуктов OILMAP/PISCES и отечественного комплекса SPILLMOD. Выбор конкретного инструмента должен определяться спецификой решаемых задач, географическими условиями эксплуатации и доступностью исходных гидрометеорологических данных.

Ключевыми тенденциями развития области являются: интеграция детерминированных моделей с вероятностными методами оценки рисков, внедрение элементов искусственного интеллекта для повышения точности прогноза, переход к облачным архитектурам и веб-интерфейсам. Для Российской Федерации стратегически важным представляется дальнейшее развитие импортонезависимых решений, адаптированных к условиям арктического шельфа и учитывающих специфику национальной нормативно-правовой базы в области предупреждения и ликвидации аварийных разливов нефти.

Список литературы:

1. Afenyo M., Veitch B., Khan F. A state-of-the-art review of fate and transport of oil spills in open and ice-covered water // Ocean Engineering. 2016. Vol. 119. P. 233–248. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.014
- 2/ Yang Z., Chen Z., Lee K., Owens E., Boufadel M. C., An C., Taylor E. Decision support tools for oil spill response (OSR-DSTs): Approaches, challenges, and future research perspectives // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 167. P. 112313. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112313
3. De Dominicis M., Pinardi N., Zodiatis G., Lardner R. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 1: Theory // Geoscientific Model Development. 2013. Vol. 6. P. 1851–1869. DOI: 10.5194/gmd-6-1851-2013
4. Berry A., Dabrowski T., Lyons K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea // Marine Pollution Bulletin. 2012. Vol. 64, № 11. P. 2489–2502. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.07.036
5. Amir-Heidari P., Raie M. Response planning for accidental oil spills in Persian Gulf: A decision support system (DSS) based on consequence modeling // Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 140. P. 116–128. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.12.053
6. Toz A. C., Buber M. Performance evaluation of oil spill software systems in early fate and trajectory of oil spill: comparison analysis of OILMAP and PISCES 2 in Mersin bay spill // Environmental Monitoring and Assessment. 2018. Vol. 190, № 9. P. 512.
7. Зацепа С. Н., Ивченко А. А., Солбаков В. В. SPILLMOD — модель гидродинамического типа для информационной поддержки реагирования на разливы нефти в море // Океанологические исследования. 2022. Т. 50, № 2. С. 56–72. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).4
8. ФГБУ «ГОИН». Программный комплекс «SPILLMOD». Инструментальные средства для моделирования разливов нефти. URL: <https://oceanography.ru>
9. Fay J. A. The spread of oil slicks on a calm sea // In: Oil on the Sea. Boston: Springer, 1969. P. 53–63. DOI: 10.1007/978-1-4684-9019-0_5
10. Nefedov Yu. V., Vostrikov N. N., Griбанov M. A., Yashmolkin A. M. Recent trends in oil and gas geology software modeling // Горный журнал. 2024. № 9. С. 34–41. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.04



11. Al-Salem K. Interactive oil spill model for Kuwaiti territorial waters by iPhone technology
// Kuwait Institute for Scientific Research. 2012. Technical Report KISR-10892.

