ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

М.В. Зарецкая¹, В.В. Лозовой², А.С. Мухин¹, А.Г. Зарецкий¹

¹ Кубанский государственный университет,

² Южный научный центр РАН

zarmv@mail.ru, niva_kgu@mail.ru, muhin@mail.kubsu.ru, sam_one@mail.ru

Аннотация. Одним из основных источников поступления загрязняющих веществ в Азовское море являются выбросы грязевых вулканов, расположенных в юго-восточной части моря, наличие которых свидетельствует о нефтяных и газовых месторождениях. Оценка экологических последствий переноса флюидов в водной среде с учетом различных придонных и поверхностных течений является сложным процессом, для изучения которого применяются методы математического моделирования.

В работе выполнены постановки граничных задач переноса грязебрекций грязевых вулканов в водной среде. Математическую модель распространения продуктов извержения можно подразделить на две подмодели: гидродинамическую и переноса. Для пассивной примеси задачи решаются независимо.

Транспорт и оседание продуктов извержения описывается уравнением переноса с учетом процессов диффузии и распада. На поверхности дна задаются условия, предполагающие их разнотипность и наличие источников поступления загрязняющих субстанций, моделирующих подводный грязевой вулкан или группу вулканов.

Для исследования граничных задач переноса применяется теория блочных структур и идеи метода матриц-пропагаторов упругих сред. Получены интегральные представления решений. Рассмотрена модельная задача исследования процесса переноса в водной среде продуктов выброса, расчеты проводились в области с тремя источниками для тяжелой субстанций. Математическое моделирование позволило определить закономерности переноса, формирования загрязненности разнородных участков водоема и выявить места повышенного экологического риска.

Ключевые слова: нефтегазоносная территория, грязевой вулканизм, моделирование, модель переноса, качество вод

1. Введение

Российский сектор акватории Азовского моря находится под воздействием многочисленных источников загрязнения как антропогенного, так и естественного происхождения. К антропогенным источникам относится сток реки Кубань, ливневые стоки с прибрежной территории, судоходство, буровые работы, производственная деятельность предприятий нефтегазового комплекса, осадки. В качестве естественных источников рассматривают водные организмы, продуцирующие в результате жизнедеятельности, например, углеводороды, и подводные грязевые вулканы. В соответствии со Стратегией природоохранной деятельности на лицензионном участке и Программой экологического оздоровления Азовского моря предприятие нефтегазового комплекса обязано осуществлять на лицензионном участке комплексный экологический мониторинг и природоохранные мероприятия для сохранения и оздоровления экосистемы моря.

Для определения содержания токсичных элементов (кадмий, свинец, ртуть, мышьяк и др.) применяются методы экоаналитического контроля, сочетающие преимущество высокой чувствительности и экспрессности. Особый интерес представляет

определение в пробах вод полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), включая нафталин, пирен, хризен, бензапирен, антрацен, и нефтепродуктов.

Анализируя состав нефтепродуктов, парафинов, ПАУ можно определить источник их происхождения, сравнить значения с фоновыми и сделать вывод об опасности производственной деятельности предприятия нефтегазового комплекса для экосистемы Азовского моря.

Как показывают результаты экоаналитических исследований [1], источниками углеводородов являются фитопланктон, органическое вещество высших наземных растений, выбросы подводных грязевых вулканов при их активации, а наиболее высокие концентрации нефтепродуктов отмечены на судовых трассах и в зоне коллекторно-дренажных сбросов.

Особый интерес для определения источников загрязнения акватории Азовского моря представляют грязевые вулканы, которые находятся вблизи осваиваемых месторождений углеводородного сырья. При разработке и освоении нефтегазового месторождения в среду могут попадать нефтяные компоненты, ПАУ, фенолы, тяжелые металлы. Эти же соединения попадают в воду из извергающихся

грязебрекчий. В отличие от иных перечисленных естественных и антропогенных источников углеводородов, результаты воздействия которых определяются экоаналитическими методами «по факту», выбросы грязевую вулканов при их активации могут быть спрогнозированы, применением методов математического моделирования.

2. Моделирование экологических последствий выбросов подводных грязевых вулканов

Одним из основных источников поступления загрязняющих веществ в Азовское море являются выбросы грязевых вулканов, расположенных в юго-восточной части моря, наличие которых свидетельствует о нефтяных и газовых месторождениях. Геохимические исследования газовой фазы грязевых вулканов позволили заключить, что, как правило, в них преобладает метан, количество азота и тяжелых углеводородных газов очень невелико, а инертные аргон, ксенон и криптон присутствуют лишь в долях процента. Среди жидких продуктов грязевых вулканов наиболее распространены воды гидрокарбонатно-хлоридного и хлоридно-натриевого типов, в которых наблюдаются повышенные содержания бора, брома, йода, натрия, лития и некоторых других элементов.

Грязевые вулканы, расположенные в акватории Темрюкского залива, при активации могут быть источниками поступления полициклических ароматических углеводородов различных классов, серосодержащих соединений, фенолов, тяжелых металлов [1].

Оценка экологических последствий переноса флюидов в водной среде с учетом различных придонных и поверхностных течений является сложным процессом, для изучения которого применяются методы математического и имитационного моделирования. Математическое моделирование позволяет исследовать закономерности переноса продуктов извержения, формирования загрязненности разнородных участков водоема и выявить места повышенного экологического риска [2; 3].

Математическую модель распространения продуктов извержения можно подразделить на две подмодели: гидродинамическую и переноса. Гидродинамическая подмодель позволяет получить распределение поля скоростей в потоке, которое будет использоваться в уравнениях переноса на втором этапе решения задачи. Для пассивной примеси, когда переносимая субстанция (СБ) не влияет на течение в целом, задачи решаются независимо.

На первом этапе течение жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса с граничными условиями прилипания на твердых поверхностях

и кинематическим и динамическим условиями на свободной поверхности:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x_1} + v \frac{\partial s}{\partial x_2} + w \frac{\partial s}{\partial x_3} = 0, \quad (3)$$

$$p = p_a.$$

Здесь $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$ – вектор скоростей потока; $\mathbf{F} = \{F_{x_1}, F_{x_2}, F_{x_3}\}$ – известные массовые силы; $\rho(x_1, x_2, x_3, t)$ – плотность; p – давление, p_a – атмосферное давление; $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематический коэффициент вязкости; m – динамический коэффициент вязкости; $s(x_1, x_2, x_3, t) = 0$ – уравнение свободной поверхности.

На втором этапе транспорт и оседание продуктов извержения описывается уравнением переноса с учетом процессов диффузии и распада:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \cdot \mathbf{C}) + \sigma_0 C = \nabla(\mathbf{K} \nabla C) + f(\mathbf{x}, t), \quad (4)$$

где C – концентрация примеси; $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$ – скорости переноса примеси (определяются в результате решения уравнений Навье-Стокса гидродинамической подмодели (1) – (3)); $\mathbf{K} = \{K_{x_1}, K_{x_2}, K_{x_3}\}$ – коэффициенты диффузии; $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3\}$ – координаты источника в декартовой системе координат; σ_0 – коэффициент поглощения, характеризующий взаимодействие примеси с водой или воздухом; $f(\mathbf{x}, t)$ – функция источника. Скорость и коэффициенты диффузии зависят, в общем случае, от координат.

В начальный момент времени во всех точках расчетной области концентрация загрязняющей субстанции задается равной нулю или некоторой фоновой величине, причем эти значения могут быть различными в разных частях области:

$$C(x_1, x_2, x_3, t) = C_0 \text{ при } t=0.$$

Граничные условия выписываются в зависимости от типов СБ, особенностей дна и формулируются как граничные условия смешанного типа, изменяющиеся при движении вдоль границы. Это приводит к исследованию краевых задач как псевдодифференциальных операторов эллиптического типа в пространстве медленно растущих обобщенных функций с последующим сведением операторных уравнений к системам линейных интегральных уравнений первого рода [2; 3].

Для повышения достоверности результатов расчетов возможно использование информации о скоростях течений и иных физико-механических характеристиках среды на основе фактических измерений.

3. Исследование математической модели оценки последствий выбросов подводных грязевых вулканов

Для получения более точных и адекватных результатов при моделировании свойств среды водоема вводим блочную структуру с блоками в форме слоев таким образом, чтобы в каждом слое скорости и диффузионные характеристики можно было считать величинами постоянными, каждый слой может иметь свои, в общем случае различные характеристики. Запишем уравнение переноса СБ (4) в водной среде в виде:

$$\frac{\partial C^j}{\partial t} + u^j \frac{\partial C^j}{\partial x_1} + v^j \frac{\partial C^j}{\partial x_2} + (w^j - w_g^j) \frac{\partial C^j}{\partial x_3} + \sigma_0 C^j - \mu^j \left(\frac{\partial^2 C^j}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 C^j}{\partial x_2^2} \right) - \nu^j \frac{\partial^2 C^j}{\partial x_3^2} = f_n(x_1, x_2, x_3, t), \quad j=1, \dots, N. \quad (5)$$

Между слоями задаются условия сопряжения в форме равенства потоков или концентраций:

$$\nu^j \frac{dC^j(x_3^{j+1})}{dx_3} = \nu^{j+1} \frac{dC^{j+1}(x_3^{j+1})}{dx_3}, \quad (6)$$

$$C^j(x_3^{j+1}) = C^{j+1}(x_3^{j+1}) \quad (j=2, \dots, N-1).$$

На поверхности дна задаются условия, предполагающие их разнотипность и наличие источников поступления загрязняющих субстанций, моделирующих подводный грязевой вулкан или группу вулканов.

На нижней границе пакета слоев x_3^1 ставится граничное условие:

$$\left[a^1 \frac{\partial C^1}{\partial x_3} - b^1 C^1 \right]_{x_3=0} = q(x_1, x_2, t), \quad (x_1, x_2) \in \Omega,$$

$$\left[a^1 \frac{\partial C^1}{\partial x_3} - b^1 C^1 \right]_{x_3=0} = 0, \quad (x_1, x_2) \notin \Omega.$$

Здесь a^1, b^1 – параметры граничных условий, характеризуют взаимодействие подстилающей поверхности с оседающими СБ; $q(x_1, x_2, t)$ – функция источника, заданного в области Ω , моделирует интенсивность активного грязевого вулкана; Ω – область дна, в которой локализуется один или группа грязевых вулканов.

На верхней границе пакета слоев:

$$\left[a^N \frac{\partial C^N}{\partial x_3} - b^N C^N \right]_{x_3=x_3^N} = 0.$$

Для исследования поставленных граничных задач применим идеи метода матриц-пропагаторов упругих сред, предложенных в работах [4–6]. В этом случае решение имеет вид:

$$C^j(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K^j(\alpha_1, \alpha_2, x_3) \times Q(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2)} d\alpha_1 d\alpha_2,$$

$$K^j(\alpha_1, \alpha_2, x_3) = \sum_{i=1}^2 t_i^j \theta_i^j,$$

$$\theta_{1,2}^j = 0,5(\nu^j)^{-1} \left((w^j - w_g^j) \pm \sqrt{(w^j - w_g^j)^2 + 4\nu^j \sigma^j} \right),$$

$$\sigma^j = \mu^j (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) - i(u^j \alpha_1 + v^j \alpha_2),$$

где $K^j(\alpha_1, \alpha_2, x_3)$ – символ функции Грина; $Q(\alpha_1, \alpha_2)$ – символ функции источника; α_1, α_2 – параметры двумерного преобразования Фурье; $\theta_{1,2}^j$ – корни характеристического многочлена матричной системы уравнений, получаемой после применения преобразования Фурье к исходной системе уравнений; t_i^j подлежит определению из матричных уравнений, не представленных здесь в силу своей громоздкости, вид которых определяется наличием поверхностных или внутренних источников; j – номер слоя.

Численные расчеты проводились для модельной задачи в безразмерной форме. Размеры области шельфа 3000×3500 , глубина переменная. По глубине моделируем исследуемую область пакетом четырех слоев, в каждом из которых скорость течения постоянна. На дне имеются три источника выбросов тяжелой субстанции.

В безразмерных единицах заданы следующие значения величин. Высоты слоев $h_1=15, h_2=25, h_3=30, h_4=35$; $(900, 0, 0), (800, -900, 0), (800, 900, 0)$ координаты источников; интенсивность выброса для первого источника принимается равной 1, для второго и третьего – равной 2; значения скоростей по слоям $(-1, 0), (-0.5, 0.5), (1.5, 1.5), (0.5, 0)$; значения коэффициентов диффузии во всех слоях $\mu=10^{-3}, \nu=10^{-2}$; коэффициент поглощения σ_0 принимается равным 0.

По результатам расчетов получена качественная картина распространения и оседания тяжелой составляющей грязебрекчий грязевых вулканов (рис. 1), максимальные значения концентраций: в области первого источника – $2,368 \cdot 10^{-4}$, в области второго источника – $4,169 \cdot 10^{-4}$, в области третьего источника – $4,141 \cdot 10^{-4}$.

По результатам расчетов в процессе извержения грязевого вулкана формируется устойчивая локализованная область оседания тяжелых составляющих на поверхность дна в непосредственной близости от источника. Происходит накопление субстанции, максимальное значение концентрации существенно зависит от длительности извержения и скорости придонных течений. Для кратковременного извержения получена максимальная концентрация на уровне мощности источника. Для длительного

извержения концентрация осевших тяжелых фракций изверженного материала может существенно превышать ПДК, особенно в случае слабых придонных течений.

Рис 1. Область оседания продуктов извержения 3 подводных грязевых вулканов

Обширность пораженной территории зависит от значения коэффициентов диффузии, уровень кон-

центрации – от модулей скорости и интенсивности выброса. Чем меньше скорости, тем более компактна область выпадения примеси, и тем больше значение максимальной концентрации. Такие результаты вполне соответствуют реальным условиям.

После завершения извержения происходит несущественное размывание области и снос в направлении придонных течений. Процесс является длительным, зависит от скорости придонных течений, массы изверженного материала, уровня турбулентной диффузии, интенсивности процесса самоочищения экосистемы.

Приведенные расчеты для тяжелых субстанций согласуются с наблюдаемой картиной извержения подводных вулканов. Извергаясь, грязевые вулканы создают в море острова, подводные банки и гряды, исчезающие после сильных штормов. Также результаты хорошо вписываются в динамику изменения уровня загрязнения донных осадков в акватории Темрюкско-Ахтарского лицензионного участка ООО «НК «Приазовнефть», представленную в работах [7; 8].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края (грант № 19-41-230002).

Список литературы:

1. *Темердашев З.А., Корпакова И.Г., Елецкий Б.Д.* Загрязнение нефтяными компонентами элементов экосистемы Темрюкско-Ахтарского лицензионного участка // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.* 2017. № 6. С. 9–15.
2. *Бабешко В.А., Бабешко О.М., Зарецкая М.В., Капустин М.С., Шестопалов В.Л.* Дифференциальный метод факторизации в задачах геоэкологии // *Вычислительная механика сплошных сред.* 2013. Т. 6. № 1. С. 5–11.
3. *Зарецкая М.В.* Моделирование процесса массопереноса в средах со сложным характером распределения параметров // *Вычислительные технологии.* 2003. Т. 8. № 5. С. 58–62.
4. *Сыромятников П.В.* Матричный метод построения символа функции Грина для стационарных задач турбулентной диффузии в многослойных средах // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества.* 2018. № 3. С. 62–71.
5. *Karmazin A., Kirillova E., Seemann W., Syromyatnikov P.* A study of time harmonic guided Lamb waves and their caustics in composite plates // *Ultrasonics.* 2013. Vol. 53. Iss. 1. P. 283–293.
6. *Сыромятников П.В.* Периодическая модель распространения загрязняющих веществ в многослойной среде // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества.* 2005. Приложение № 1. С. 79–86.
7. *Павленко Л.Ф., Корпакова И.Г., Елецкий Б.Д., Скрыпник Г.В., Курилов П.И., Вотинова Т.В., Анохина Н.С., Кораблина И.В.* Нефтяные компоненты и тяжелые металлы в выбросах грязевого вулкана «Голубицкий» // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.* 2017. № 6. С. 29–34.
8. *Бабешко В.А., Зарецкая М.В., Евдокимова О.В., Павлова А.В., Бабешко О.М., Круглякова Р.П., Курилов П.И., Гендина А.М., Тереножкин И.В.* Оценка влияния вулканических и природно-технологических загрязнений на экосистему азовского моря // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.* 2010. № 9. С. 6–12.

GEOECOLOGICAL MONITORING OF OIL AND GAS TERRITORIES

M.V. Zaretskaya¹, V.V. Lozovoy², A.S. Muhin¹, A.G. Zaretskiy¹¹ Kuban State University, Krasnodar, Russia² Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia
zarmv@mail.ru, niva_kgu@mail.ru, muhin@mail.kubsu.ru, sam_one@mail.ru

Abstract. One of the main sources of pollutants in the Sea of Azov are emissions of mud volcanoes located in the southeastern part of the sea, the presence of which indicates oil and gas fields. The assessment of the environmental consequences of fluid transport in the aquatic environment, taking into account various bottom and surface currents, is a complex process, for the study of which methods of mathematical modeling are used. In this paper, we performed the formulation of boundary problems for the transfer of mud volcanoes mud-cracks in the aquatic environment. The mathematical model of the distribution of the products of the eruption can be divided into two sub-models: hydrodynamic and transport. For a passive impurity, the problems are solved independently. Transport and sedimentation of the products of the eruption is described by the transport equation. The conditions on the bottom surface take into account the heterogeneity and the presence of sources of pollutants that simulate an underwater mud volcano or a group of volcanoes.

The theory of block structures and the ideas of the method of matrix-propagators of elastic media are used to study boundary transport problems. We received integral representations of solutions. The model problem of studying the transfer of discharge products in the aquatic environment is considered, calculations were carried out in an area with three sources for heavy substances. Mathematical modeling allowed us to determine the patterns of transport, the formation of pollution in heterogeneous areas of the reservoir and to identify places of increased environmental risk.

Keywords: oil and gas area, mud volcanism, modeling, transport model, water quality

References

1. *Temerdashev Z.A., Korpakova I.G., Yeletsky B.D.* Zagryazneniye neftyanyimi komponentami elementov ekosistemy Temryuk-Akhtarskogo litsenzionnogo uchastka [Pollution of oil components of the ecosystem elements of the Temryuk-Akhtarsk license area] // *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas sector]. 2017. № 6. P. 9–15. (In Russian).
2. *Babeshko V.A., Babeshko O.M., Zaretskaya M.V., Kapustin M.S., Shestopalov V.L.* Differentsial'nyy metod faktorizatsii v zadachakh geologii // *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational continuum mechanics]. 2013. T. 6. № 1. P. 5–11. (In Russian).
3. *Zaretskaya M.V.* Modelirovaniye protsessa massoperenosa v sredakh so slozhnym kharakterom raspredeleniya parametrov // *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computational technologies.]. 2003. T. 8. № 5. P. 58–62. (In Russian).
4. *Syromyatnikov P.V.* Matrichnyy metod postroyeniya simvola funktsii Grina dlya statsionarnykh zadach turbulentnoy diffuzii v mnogosloynnykh sredakh [The matrix method for constructing the symbol of the Green function for stationary problems of turbulent diffusion in multilayer media] // *Jekologicheskij vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo jekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation]. 2018. № 3. P. 62–71. (In Russian).
5. *Karmazin A., Kirillova E., Seemann W., Syromyatnikov P.A.* Study of time harmonic guided Lamb waves and their caustics in composite plates // *Ultrasonics*. 2013. Vol. 53. Iss. 1. P. 283–293. (In English).
6. *Syromyatnikov P.V.* Periodicheskaya model' rasprostraneniya zagryaznyayushchikh veshchestv v mnogosloynnoy srede [Periodic model of the spread of pollutants in a multilayer environment] // *Jekologicheskij vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo jekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation]. 2005. Prilozheniye № 1. P. 79–86. (In Russian).
7. *Pavlenko L.F., Korpakova I.G., Yeletskiy B.D., Skrypnik G.V., Kurilov P.I., Votinova T.V., Anokhina N.S., Korablina I.V.* Neftyanyye komponenty i tyazhelye metally v vybrosakh gryazezovogo vulkana «Golubitskiy» [Oil components and heavy metals in emissions of the Golubitsky mud volcano] // *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas sector]. 2017. № 6. P. 29–34. (In Russian).
8. *Babeshko V.A., Zaretskaya M.V., Yevdokimova O.V., Pavlova A.V., Babeshko O.M., Kruglyakova R.P., Kurilov P.I., Gendina A.M., Terenozhkin I.V.* Otsenka vliyaniya vulkanicheskikh i prirodno-tekhnologicheskikh zagryazneniy na ekosistemu azovskogo morya [Assessment of the impact of volcanic and natural-technological pollution on the ecosystem of the Sea of Azov] // *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas sector]. 2010. № 9. P. 6–12. (In Russian).