



Научная статья

DOI: <http://dx.doi.org/10.21202/2782-2923.2022.3.535-547>

УДК 332.1:338.45:622(985):504

JEL: O18, P25, Q57, R11, R13

О. В. КУДРЯВЦЕВА<sup>1</sup>,  
Е. В. СЕРЕБРЕННИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПЕРСПЕКТИВ РОССИЙСКИХ АРКТИЧЕСКИХ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ШЕЛЬФОВЫХ ПРОЕКТОВ

Контактное лицо:

**Кудрявцева Ольга Владимировна**, доктор экономических наук, профессор  
экономического факультета, Московский государственный университет имени  
М. В. Ломоносова

E-mail: [olgakud@mail.ru](mailto:olgakud@mail.ru)

eLIBRARY ID: SPIN-код: 9064-4420, AuthorID: 112178

**Серебрянников Евгений Владимирович**, специалист экономического факультета,  
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

E-mail: [e.v.serebrennikov@gmail.com](mailto:e.v.serebrennikov@gmail.com)

eLIBRARY ID: SPIN-код: 8471-8712, AuthorID: 1135386

### Аннотация

**Цель:** исследование эколого-экономических перспектив российских арктических нефтегазодобывающих шельфовых проектов методом функционального анализа.

**Методы:** математическое моделирование, сравнительный анализ, эмпирический анализ.

**Результаты:** предложен метод оценки финансового обеспечения мероприятий по ликвидации предполагаемого экологического ущерба при разливах углеводородов на арктических шельфовых нефтегазодобывающих проектах, рассмотрены модели нефтеразливов на арктических шельфовых месторождениях «Приразломное» и «Победа», проведена оценка стоимости мероприятий по ликвидации этих происшествий.

**Научная новизна:** в работе впервые проведено исследование функции финансового обеспечения мероприятий по ликвидации предполагаемого экологического ущерба при разливе углеводородов на арктических шельфовых нефтегазодобывающих месторождениях «Приразломное» и «Победа» посредством использования математического метода функционального анализа, расчет максимумов затрат, а также времени с момента начала разлива, на которое приходится эти функциональные значения. Допущение математической модели – гипотеза о константности дебита скважин (оценка сверху – используемый характерный дебит секундной добычи всего месторождения), а также пренебрежение изменениями физических свойств жидких углеводородов (вязкость, плотность) вследствие характерной годовой динамики температур арктических областей и рассмотрение динамики распространения нефтеразлива на морской поверхности в инертной фазе без учета гравитационно-вязкого и поверхностного режимов.

**Практическая значимость:** данные математического моделирования разливов могут быть использованы страховыми компаниями в рамках вычислений страховых премий, Росприроднадзором при калькуляции штрафов, а также иными надзорными ведомствами при андеррайтинге нефтегазовых арктических проектов.

**Ключевые слова:** экономика и управление народным хозяйством, добыча углеводородов в Арктике, нефтегазодобывающий комплекс, экологическая безопасность, арктический шельф, моделирование разлива, технологии ликвидации нефтеразлива

*Благодарность:* авторы благодарят рецензента за ценные замечания и предложения.

© Кудрявцева О. В., Серебрянников Е. В., 2022

© Kudryavtseva O. V., Serebrennikov E. V., 2022



Статья находится в открытом доступе в соответствии с Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), предусматривающем некоммерческое использование, распространение и воспроизводство на любом носителе при условии упоминания оригинала статьи.

**Как цитировать статью:** Кудрявцева О. В., Серебренников Е. В. Использование математических методов исследования для анализа эколого-экономических перспектив российских арктических нефтегазодобывающих шельфовых проектов // Russian Journal of Economics and Law. 2022. Т. 16, № 3. С. 535–547. DOI: <http://dx.doi.org/10.21202/2782-2923.2022.3.535-547>

#### The scientific article

O. V. KUDRYAVTSEVA<sup>1</sup>,

E. V. SEREBRENNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## USING MATHEMATICAL RESEARCH METHODS FOR ANALYZING ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC PROSPECTS OF THE RUSSIAN ARCTIC OIL AND GAS PRODUCING SHELF PROJECTS

#### Contact:

**Olga V. Kudryavtseva**, Doctor of Economics, Professor of Economics Faculty, Lomonosov Moscow State University

E-mail: [olgakud@mail.ru](mailto:olgakud@mail.ru)

eLIBRARY ID: SPIN-code: 9064-4420, AuthorID: 112178

**Evgeniy V. Serebrennikov**, expert of Economics Faculty, Lomonosov Moscow State University

E-mail: [e.v.serebrennikov@gmail.com](mailto:e.v.serebrennikov@gmail.com)

eLIBRARY ID: SPIN-code: 8471-8712, AuthorID: 1135386

#### Abstract

**Objective:** to study the ecological and economic prospects of Russian Arctic oil and gas offshore projects by the method of functional analysis.

**Methods:** mathematical modeling, comparative analysis, empirical analysis.

**Results:** a method is proposed for assessing the financial provision of measures to eliminate the alleged environmental damage caused by hydrocarbon spills in Arctic offshore oil and gas production projects; models of oil spills in the “Prirazlomnoye” and “Pobeda” Arctic offshore fields are considered; the cost of measures to eliminate these incidents is estimated.

**Scientific novelty:** for the first time, the paper investigates the function of financial provision for measures to eliminate the alleged environmental damage due to hydrocarbons spills at the “Prirazlomnoye” and “Pobeda” Arctic offshore oil and gas fields with the mathematical method of functional analysis, calculation of the maximum costs, as well as the time from the start of the spill, which accounts for these functional values. The assumption of the mathematical model is the hypothesis of the constancy of the well flow rate (the top estimate is the characteristic flow rate of the per second production of the entire field), as well as the neglect of changes in the physical properties of liquid hydrocarbons (viscosity, density) due to the characteristic annual temperature dynamics of the Arctic regions and consideration of the dynamics of the oil spill spread on the sea surface in the inert phase without taking into account the gravitationally viscous and surface modes.

**Practical significance:** the mathematical modeling data on spills can be used by insurance companies in the calculation of insurance premiums, by Rosprirodnadzor Agency in the calculation of fines, and by other supervisory agencies in the underwriting of oil and gas Arctic projects.

**Keywords:** Economics and national economy management, Hydrocarbon production in the Arctic, Oil and gas production complex, Environmental safety, Arctic shelf, Spill modeling, Oil spill elimination technologies

**Acknowledgements:** the authors are grateful to the reviewer for valuable comments and ideas.



The article is in Open Access in compliance with Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), stipulating non-commercial use, distribution and reproduction on any media, on condition of mentioning the article original.

**For citation:** Kudryavtseva, O. V., Serebrennikov, E. V. (2022). Using mathematical research methods for analyzing environmental and economic prospects of the Russian arctic oil and gas producing shelf projects. *Russian Journal of Economics and Law*, 16 (3), 535–547 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.21202/2782-2923.2022.3.535-547>

## Введение

На рубеже 1960–1970-х гг. возник новый фундаментальный фактор влияния на мировую экономику – экологический. Высокие темпы урбанизации и роста плотности технологических инфраструктур, экспоненциальный рост мирового населения и, как следствие, мирового энергопотребления, интенсификация динамики производства и трансконтинентальной логистики стали оказывать крайне пагубные экологические эффекты [1, 2].

Колоссальные выбросы углеводородов в атмосферу, загрязнение Мирового океана и почв, жесточайшая вырубка лесного покрова, оскудение пахотных земель, опустынивание, нарушение баланса количества, давлений и температур веществ в земной коре (добыча углеводородов, редкоземельных металлов, руд, создающая гигантские полости в земной коре) имеют ускоряющуюся динамику роста в последние несколько десятилетий, сохранение которой в ближайшие десятилетия может привести к глобальной экологической катастрофе необратимого характера, влекущей за собой мощнейшие социальные катаклизмы [3, 4].

Мировая политическая повестка в последние десятилетия дополнилась перманентными дискуссиями о принятии мер по недопущению такого развития ситуации посредством введения новых политических и экономических нормативов [5]. Создание Римского клуба, подписание Киотского протокола и Парижских соглашений, а также разработка модели устойчивого развития ООН в XXI в. и Конвенция Глазго – 2021 закрепили декларацию новых целей и внедрение новых установок мирового сообщества в третьем тысячелетии, основанных на формировании новых ценностей с учетом сохранения окружающей среды [6].

В рамках борьбы с изменением климата, ради сохранения экосистем моря и суши, экологизации городов и производств, в развитых (Западная Европа и Северная Америка – с 1970-х гг.) и развивающихся (страны БРИКС – с 1990-х гг.) странах вводятся новые фискальные ограничения экологического характера, проводится международная и внутренняя политика по «озеленению» производств, наблюдается стремление к низкоуглеродной экономике (минимизация выбросов углерода в атмосферу – нивелирование экологических рисков, в том числе парникового эффекта, повышение температуры земной поверхности при котором даже на несколько градусов может привести к потере 30–50 % многообразия флоры и фауны) [7].

Развитие технологий возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) в ключе парадигмы устойчивого развития бросает мощные вызовы для традиционной экономики углеводородов, однако в перспективе ближайшего столетия нефтегазодобывающая отрасль, являясь на данный момент доминантой для энергетики, транспорта и мировой логистики, будет оставаться конкурентоспособной. При малейшем неудовлетворенном спросе на керосин возникнет нарушение цепочек морских поставок, возрастут цены на продовольственные и непродовольственные товары, возникнут макроэкономические риски, стагнация и кризисы – все это является причиной актуализации дальнейших исследований в данной отрасли [3].

Более того, политическая повестка сегодняшнего дня и ее воздействие на мировую экономику диссонируют с задачами тысячелетия, упомянутыми выше. Нарушение мировой логистики, нехватка продовольствия, жесточайшие товарно-сырьевые эмбарго на мировом рынке создают дополнительную существенную нагрузку на бюджеты стран и регионов, являются причинами значительной экономической турбулентности, волатильности на рынках энергоносителей, скачков на сырьевых и валютных биржах. Все это тормозит мировую экологическую повестку и инвестиции в зеленую энергетику, ВИЭ, смещая акценты борьбы с изменением климата на вопросы энергетической безопасности и бесперебойные, политически детерминированные по-



ставки традиционных энергоносителей (ярчайший пример следствия такого рода процессов – разворот вектора сырьевого экспорта России с Запада на Восток и увеличение получаемых российским бюджетом средств на фоне роста цен на углеводороды весной и летом 2022 г. при относительном уменьшении объема поставок). На этом фоне актуальность рассмотрения экономических задач, связанных с нефтегазодобывающей отраслью, в том числе с ее экологической составляющей, только возрастает.

В настоящее время нефтегазодобыча в зоне российского арктического шельфа – прерогатива больших компаний, таких как ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», являющихся государственными по форме собственности, что обеспечивает им возможность получения значительных субсидий из федерального бюджета, а также налоговые преимущества. Это придает компаниям дополнительный импульс для развития арктических проектов, высокорискованных в плане прибыли в кратко- и среднесрочной перспективе. В крайне суровых условиях Арктики неэффективно, а порой и невозможно использовать классические методы и технологии добычи углеводородов, поэтому необходимы инновационные технологии в области геологоразведки, нефте-сервиса, добычи, транспорта, в том числе в сфере экологических решений.

Целью данного исследования является анализ эколого-экономических перспектив развития российских арктических нефтегазодобывающих шельфовых проектов.

Задачей данного исследования является изучение функции финансового обеспечения мероприятий по ликвидации предполагаемого экологического ущерба при разливе углеводородов на арктических шельфовых нефтегазодобывающих месторождениях «Приразломное» и «Победа» посредством метода функционального анализа, расчет максимумов затрат, а также времени с момента начала разлива, на которое приходится эти функциональные значения.

### **Исследование эколого-экономических перспектив российских арктических нефтегазодобывающих шельфовых проектов методом функционального анализа**

С учетом того, что практически половина (по данным Министерства финансов РФ, около 37–46 %) бюджета формируется за счет доходов от добычи и экспорта углеводородов [8], Правительство России крайне заинтересовано в качественном и количественном развитии технологий нефтегазодобычи, особенно в текущих условиях высокой степени выработки запасов углеводородов на отечественных месторождениях Каспийского, Волго-Уральского, Восточно-Сибирского, Охотского бассейнов. Актуальной стратегической задачей настоящего времени является интенсификация добычи недр в Арктической зоне России. Это определено в Указе «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», подписанной Президентом России В. В. Путиным 26 октября 2020 г. Добыча ископаемых ресурсов в арктическом регионе влечет за собой экологический ущерб, попытки учета которого уже предпринимаются в исследованиях по оценке его минерально-сырьевого потенциала [9].

Не менее актуальными на этом фоне являются задачи экологической безопасности, проблематика моделирования процессов, связанных с возможными разливами продуктов углеводородов жидкой фазы в арктических условиях, поэтому создание методологии расчета экологического ущерба от возможных происшествий на арктических шельфовых территориях особенно актуально сегодня.

Вопросам изучения методов оценки разливов нефтепродуктов на суше, море и шельфе, а также подсчета стоимости мероприятий по их ликвидации посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ исследователей из различных областей науки и регионов мира с конца 1970-х гг. прошлого столетия. Примечательны работы исследователей Гримас, Аллен и Долцетти «Экспресс-оценка скорости проникновения углеводородов в почвы сразу же после аварийного разлива для целей быстрого реагирования» [10], Дж. Фэя «Физические процессы нефтяного разлива на морской поверхности» [11], О. В. Кудрявцевой и А. А. Поповой «Снижение экологических ущербов в энергетическом комплексе посредством определения масштабов загрязнения от разливов нефти на нефтепроводах» [12], «Основные проблемы экологического страхования в России и пути их решения» [13], «Проблемы страхования ответственности за загрязнение окружающей среды в российском нефтегазовом секторе» [14], П. А. Красильникова и В. В. Середина «Изу-

---

Кудрявцева О. В., Серебренников Е. В. Использование математических методов исследования для анализа эколого-экономических перспектив...  
Kudryavtseva O. V., Serebrennikov E. V. Using mathematical research methods for analyzing environmental and economic prospects...



чение закономерностей и построение математических моделей распределения углеводородов по разрезу на территориях нефтеперерабатывающих предприятий» [15], в которых последовательно развиваются идеи оценки динамики распространения и величины экологического ущерба при разливе углеводородов, а также методики возможных мероприятий по их ликвидации. Стоит отметить, что большая часть работ по данной тематике посвящена разливам продуктов углеводородов на суше, на континентальных территориях, тогда как рассмотрение данной задачи на морской поверхности и на шельфе очень важно в настоящее время: при разливе углеводородов жидкой фракции необходимо учитывать влияние морских течений, градиент температур и множество других факторов, сводящих математическое моделирование лишь к описательной модели (не говоря уже о случаях неконтролируемых выходов попутного газа на морском шельфе и сипов, описываемых задачей распространения газа в слоях жидкости, восходящей в фундаментальную механику).

Постановлением Министерства природных ресурсов и экологии России от 31.12.2020 № 1139 «Методика расчета финансового обеспечения осуществления мероприятий, предусмотренных планом предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, включая возмещение в полном объеме вреда, причиненного окружающей среде, жизни, здоровью и имуществу граждан, имуществу юридических лиц в результате разливов нефти и нефтепродуктов», размер финансового обеспечения мероприятий по ликвидации аварий разливов нефти определяется по формуле:

$$F = V_1 \times P_1 + V_2 \times P_2 + \dots + V_i \times P_i + \dots + V_n \times P_n,$$

где  $F$  – сумма финансового обеспечения (руб.);  $n$  – количество мероприятий в соответствии с планом предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, требующих финансовых затрат;  $V_i$  – объем работ на выполнение  $i$ -го мероприятия, который необходимо провести для предупреждения и ликвидации разлива нефти и нефтепродуктов в соответствии с планом предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов;  $P_i$  – стоимость единицы объема работ (услуг) на выполнение  $i$ -го мероприятия по предупреждению и ликвидации разлива нефти и нефтепродуктов в соответствии с планом предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Этот показатель определяется из расходов на соответствующие работы (услуги) по стоимости, сложившихся в субъектах Российской Федерации, включающих собственные расходы организации на закупку необходимых материалов и оборудования, расходы на оплату работ (услуг) специализированных экспертных организаций по локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (в том числе расходы на оплату работ (услуг) аварийно-спасательных служб и аварийно-спасательных формирований).

Общность данной модели характеризуется отсутствием конкретного, прикладного описания составляющих подсчета затрат на мероприятия по ликвидации нефтеразливов, что оставляет пространство со стороны компаний-виновников для недобросовестного отношения к экологическому контролю, имитации мероприятий по предотвращению и ликвидации возможных происшествий, минимизации инвестиций в природоохранную отрасль. Авторы статьи предлагают методику расчета возможной оценки финансового обеспечения мероприятий по ликвидации предполагаемого экологического ущерба при разливе углеводородов на арктическом шельфовом нефтегазодобывающем проекте, выраженную следующей формулой:

$$F = V_1 \times P_1 + V_2 \times P_2 + V_3 \times P_3,$$

где  $F$  – сумма финансового обеспечения (руб.);  $V_1$  – временной промежуток необходимого фрахта траловых кораблей боновых заграждений и сбора продуктов разлива, оборудованных скиммерами (время использования в часах);  $P_1$  – стоимость фрахтового договора для данного происшествия, измеряемая по формуле:

$$P_1 = p \times N,$$

где  $p$  – цена фрахта одного судна за единицу времени (руб.);  $N$  – количество необходимых кораблей;  $V_2$  – временной промежуток необходимого фрахта подводных носителей и боновых заграждений для сбора продуктов



разлива (время использования в часах);  $P_2$  – стоимость фрахтового договора аренды подводных носителей и боновых заграждений для данного происшествия (руб.);  $V_3$  – количество необходимых для данного происшествия химических реагентов расщепления нефтепродуктов (диспергентов, в килограммах);  $P_3$  – рыночная/оптовая стоимость диспергентов (рублей за килограмм).

Рассмотрим более подробно формирование значений  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$ : эти величины являются следствием параметров нефтеразлива: радиуса, площади покрытия, количества выбросов, временной динамики распространения. Для оценки динамики распространения возможного нефтеразлива на арктическом шельфовом нефтегазодобывающем проекте в незамерзающей зоне и зоне молодого льда возможно применение частного решения задачи распространения нефтяного пятна на морской поверхности, используя уравнение непрерывности, стационарное уравнение движения жидкости и закон сохранения массы [16; 17. С. 87–93; 18], которые задают функцию радиуса распространения нефтяного пятна в зависимости от нескольких параметров в осесимметричном приближении [19, 11]:

$$r = a \times \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \times g \times V \times t^2 \right)^{0,25},$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности ( $a = 1,14$  получен экспериментально);  $\rho$  – плотность морской воды;  $\rho_0$  – плотность жидких углеводородов;  $g$  – ускорение свободного падения;  $V$  – объем разлива жидких углеводородов за время  $t$ ;  $t$  – время, прошедшее с момента неконтролируемого выхода жидких углеводородов на морскую поверхность.

Используя данное уравнение с подстановкой соответствующих данному месторождению коэффициентов, можно осуществить математическое моделирование динамики распространения нефтяного пятна во времени, его радиуса и площади. Данная закономерность, экспериментально полученная Д. Фэем в 1971 г., включена в «Методические рекомендации по оценке опасности подводных потенциально опасных объектов во внутренних водах и территориальном море Российской Федерации» (утверждено МЧС России 02.12.2021 № ДЗ-17-802-5172-ВЯ)<sup>1</sup> после изучения динамики нефтеразлива под Новороссийском осенью 2021 г. и его последующей ликвидации. Стоит отметить, что решение задачи нефтеразлива на морской поверхности, полученное Фэем, содержит три вариации данной формулы, отражающие изменение динамики распространения разлива (инерционная, вязкая и поверхностно-гравитационная фаза). В контексте рассматриваемой нами задачи осуществим аппроксимацию, используя формулу лишь первого, инерционного этапа, отражающего максимальную динамику разлива с учетом прошедшего с начала происшествия времени.

Рассмотрим формулу суммарной стоимости финансового обеспечения мероприятий по ликвидации аварийных разливов нефти в общем виде, подставляя все компоненты в финальную формулу:

$$F = V_1 \times p \times N + V_2 \times P_2 + V_3 \times p \times r^2,$$

где  $F$  – сумма финансового обеспечения (руб.);  $V_1$  – временной промежуток необходимого фрахта траловых кораблей боновых заграждений и сбора продуктов разлива, оборудованных скиммерами (время использования в часах);  $p$  – цена фрахта одного судна за единицу времени (руб.);  $N$  – количество необходимых кораблей;  $V_2$  – временной промежуток необходимого фрахта подводных носителей и боновых заграждений для сбора продуктов разлива (время использования в часах);  $P_2$  – стоимость фрахтового договора аренды подводных носителей и боновых заграждений для данного происшествия (руб.);  $V_3$  – количество необходимых для данного происшествия химических реагентов расщепления нефтепродуктов (диспергентов, в килограммах);  $P_3$  – рыночная/оптовая стоимость диспергентов (рублей за килограмм).

<sup>1</sup> URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_416631/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_416631/) (дата обращения: 20.04.2022).



С учетом того, что время осуществления операции по устранению экологического ущерба и время разлива – две различные динамические величины, примем новые обозначения переменных:

$$\begin{aligned}V_1 &= V_2 = T, \\ p \times N + P_2 &= x, \\ V_3 &= y,\end{aligned}$$

и при подстановке новых обозначений итоговая формула примет вид:

$$F(t, T) = T \times x + y \times \pi \times a^2 \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \times g \times V \times t^2 \right)^{0,5},$$

где  $T$  – время, потраченное на реализацию мероприятий по ликвидации последствий нефтеразлива (в часах);  $x$  – суммарная спотовая стоимость оборудования и транспорта для реализации мероприятий по ликвидации разлива (руб.);  $y$  – количество необходимых для данного происшествия химических реагентов расщепления нефтепродуктов (диспергентов, в килограммах).

Учтем также, что между значениями  $t$  и  $T$  существует временной лаг, выражающий зависимость данных величин:

$$t = T + C,$$

где  $C$  – константа, выражающая временной промежуток между началом разлива и началом мероприятий по его устранению, т. е. среднее время прибытия судов ликвидации аварий разливов нефти (далее – ЛАРН) на место разлива от порта приписки.

Исследуем эту функцию, монотонную, непрерывную и дифференцируемую на всей области определения, на наличие условных экстремумов методом математического функционального анализа [20]. Исследуем полученную функцию суммарной стоимости:

$$F(t) = (t - C) \times x + y \times \pi \times a^2 \times t \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \times g \times V \right)^{0,5}.$$

Фактически функция суммарной стоимости мероприятий по устранению разлива принимает вид линейной функции от времени, и мы получим максимальное значение функции стоимости и значение времени, в течение которого оно достигается.

В качестве примеров рассмотрим нефтедобычу на морской ледостойкой стационарной платформе (далее – МЛСП) «Приразломная», находящейся на шельфе Печорского моря в 60 километрах от береговой линии (проект ПАО «Газпром», добыча начата в декабре 2014 г.) и добычу нефти на Восточно-Приновоземельском месторождении «Победа», скважина Университетская-1 (проект ПАО «НК «Роснефть», добыча ведется с сентября 2014 г.), находящемся на территории Карского моря, в 250 километрах от материковой зоны [21–22]. Эти проекты являются уникальными, пионерными для мировой нефтегазодобывающей отрасли в плане сложности климатических условий, северной широтности, а также одними из немногих функционирующих на сегодняшний момент арктических шельфовых проектов полного цикла: бурение, добыча, хранение, подготовка и отгрузка на нефтеналивные суда. Оба шельфовых месторождения находятся в граничных морских зонах незамерзающей части и зон начального, молодого льда Печорского и Карского морей Северного Ледовитого океана (по данным Арктического и Антарктического научно-исследовательского института). Рассмотрим задачу нахождения радиуса нефтеразливов на поверхности в локации этих месторождений, учитывая, что морская поверхность представляет собой жидкую фазу либо смесь жидкой и твердой фаз (пористый лед, обладающий аморфными свойствами), с выходом нефтепродуктов жидкой фазы на морскую поверхность и последующим их распространением в однородной и двухфазной среде. В данном приближении задача сводится к изучению динамики распространения нефтеразлива на морской поверхности в инертной фазе без учета гравитационно-вязкого и поверхностного режима [11].



Таблица 1

**Сравнение месторождений «Приразломное» и «Победа» по геофизическим характеристикам и параметрам добычи**

**Table 1. Comparison of “Prirazlomnoye” and “Pobeda” fields by geophysical characteristics and production parameters**

Месторождение / Field	Геофизические характеристики / Geophysical characteristics	Параметры добычи и время подхода судов ЛАРН / Production parameters and arrival time of Oil Spill Contingency Plan vessels
«Приразломное», проект ПАО «Газпром» / “Prirazlomnoye”, Gazprom project	Глубина моря – 19–20 м. Объем запасов более – 70 млн т / Sea depth – 19–20 meters. Reserves – over 70 mln tons	$q = 0,175 \text{ м}^3/\text{с}$ (15 120 м <sup>3</sup> /сут) C = 4 часа / $q = 0,175 \text{ м}^3/\text{с}$ (15,120 м <sup>3</sup> /day) C = 4 hours
«Победа», проект ПАО «НК «Роснефть» / “Pobeda”, NK Rosneft project	Глубина моря – 80–90 м. Объем запасов – более 100 млн т / Sea depth – 80–90 meters. Reserves – over 100 mln tons	$q = 0,325 \text{ м}^3/\text{с}$ (28 080 м <sup>3</sup> /сут) C = 28 часов / $q = 0,325 \text{ м}^3/\text{с}$ (28,080 м <sup>3</sup> /day) C = 28 hours

Источник: составлено авторами на основе данных ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть». URL: <https://www.gazprom.ru/projects/prirazlomnoye/>; <https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore/>

Source: compiled by the authors based on the data of Gazprom Public Corporation and NK Rosneft Public Corporation, available at: <https://www.gazprom.ru/projects/prirazlomnoye/>; <https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore/>

Допущение математической модели – гипотеза о константности дебита скважин (оценка сверху – используемый характерный дебит секундной добычи всего месторождения), а также пренебрежение изменениями физических свойств жидких углеводородов (вязкость, плотность) вследствие характерной годовой динамики температур арктических областей.

Наиболее эффективным методом ликвидации разливов в данных широтах является механический метод с использованием подвижных скиммеров для сбора, диспергентов для переработки и смыва нефтепродуктов, а также подводных носителей ЛАРН в качестве сборных емкостей [23].

Учитывая среднюю плотность нефтеконденсата около 800 кг/м<sup>3</sup>, дебит скважин, время растекания, объем разлива нефти представляет чрезвычайную ситуацию федерального значения в обоих рассмотренных случаях.

Исходя из рыночной ценовой конъюнктуры фрахта (Архангельск), аренды оборудования для сбора нефти в акватории российской Арктики (Архангельск, Новый Уренгой, Нарьян-Мар): траловые суда ЛАРН, оборудованные скиммерами и боновыми ограждениями с подводными носителями (среднерыночная стоимость фрахта – 675 000 руб/сут), стоимости химических диспергентов (среднерыночная стоимость – 400 руб/кг), авторами был осуществлен расчет средней стоимости мероприятий по ликвидации предполагаемого экологического ущерба, представленный в табл. 2, 3.

Итоговые величины, указанные в таблицах, не включают зарплатный фонд, страховые платежи и учет возможных штрафов со стороны Росприроднадзора, функционирующего в контексте текущих методик. Размер ожидаемых страховых выплат, определяемый рекомендациями Международной конвенции о гражданской ответственности за ущерб от загрязнения нефтью (CLC 92) [24], составляет 400 SDR (специального права заимствования за тонну выбросов) для показателей модели разлива на «Приразломном», т. е. 914 458 000 руб., на месторождении «Победа» – 2 400 SDR, что эквивалентно сумме 5 456 748 000 руб.



Таблица 2

Стоимость технологий устранения нефтеразлива на месторождении «Приразломное»

Table 2. Cost of technologies for eliminating an oil spill at “Prirazlomnoye” field

Название технологий и оборудования / Technologies and equipment	Объем работ / Volume of works	Стоимость, руб. / Cost, rubles
Траловое судно, оборудованное скиммерами, $V_1$ / Trawling vessel with oil skimmers, $V_1$	Площадь – 324 000 м <sup>2</sup> , время разлива – 29 ч, радиус – 321 м, масса нефти – 14 112 т, объем – 17 640 м <sup>3</sup> / Area – 324,000 sq.m., spillage time – 29 hours, radius – 321 m, oil mass – 14,112 tons, volume – 17,640 cubic meters	196 349 000
Подводные носители и боновые заграждения, $V_2$ / Underwater carriers and oil-spill booms, $V_2$	Площадь – 324 000 м <sup>2</sup> , глубина – 8,2 см / Area – 324,000 sq.m., depth – 8.2 cm	37 000 000
Диспергенты переработки, $V_3$ / Processing dispersants, $V_3$	Площадь – 324 000 м <sup>2</sup> / Area – 324,000 sq.m.	64 100 000
Время / Time	$t = 22$ ч / hours	Итого / Total 297 449 000

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Таблица 3

Стоимость технологий устранения нефтеразлива на месторождении «Победа»

Table 3. Cost of technologies for eliminating an oil spill at “Pobeda” field

Название технологий и оборудования / Technologies and equipment	Объем работ / Volume of works	Стоимость, руб. / Cost, rubles
Траловое судно, оборудованное скиммерами, $V_1$ / Trawling vessel with oil skimmers, $V_1$	Площадь – 1 130 000 м <sup>2</sup> , время разлива – 42 ч, радиус – 600 м, масса нефти – 72 800 тонн, объем – 91 100 м <sup>3</sup> / Area – 1,130,000 sq.m., spillage time – 42 hours, radius – 600 m, oil mass – 72,800 tons, volume – 91,100 cubic meters	1 230 538 000
Подводные носители и боновые заграждения, $V_2$ / Underwater carriers and oil-spill booms, $V_2$	Площадь – 1 130 000 м <sup>2</sup> , глубина – 9,8 см / Area – 1,130,000 sq.m., depth – 9.8 cm	185 276 000
Диспергенты переработки, $V_3$ / Processing dispersants, $V_3$	Площадь – 1 270 000 м <sup>2</sup> / Area – 1,270,000 sq.m.	342 112 000
Время / Time	$t = 25$ ч / $t = 25$ hours	Итого / Total 1 759 464 000

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.



Рыночная стоимость финансовых потерь разлива нефтепродуктов составляет в среднем 127 008 000 руб. для месторождения «Приразломное» и 655 920 000 руб. для месторождения «Победа», где равновесная среднегодовая биржевая стоимость данной марки нефти – \$80, равновесный среднегодовой биржевой курс национальной валюты – \$0,013 [25].

### Выводы

С учетом существенной волатильности ценообразования на мировом нефтегазовом рынке, тесно связанном с непредсказуемым природным и геополитическим климатом, полученные значения являются показательным доводом для создания государственного экологического финансового фонда, средства из которого могут быть использованы для осуществления мероприятий по ликвидации разливов федерального значения (существует вероятность повторения рыночной ситуации мая 2020 г., когда фьючерсная стоимость нефти *WTI* достигла отрицательных значений \$38 за баррель впервые в истории, что может стать веской причиной для нехватки средств экологического фонда компаний на ликвидацию аварий разливов нефти [26, 27]).

Исследование функции финансового обеспечения мероприятий по ликвидации предполагаемого экологического ущерба при разливе углеводородов на арктических шельфовых нефтегазодобывающих месторождениях «Приразломное» и «Победа» посредством функционального анализа позволили рассчитать максимумы затрат, а также время с момента начала разлива, на которое приходится эти функциональные значения, – 22 и 25 часов соответственно, что практически совпадает с функциональной динамикой разлива. Допущение математической модели – гипотеза о константности дебита скважин (оценка сверху – используемый характерный дебит секундной добычи всего месторождения), а также пренебрежение изменениями физических свойств жидких углеводородов (вязкость, плотность) вследствие характерной годовой динамики температур арктических областей и рассмотрением динамики распространения нефтеразлива на морской поверхности в инертной фазе без учета гравитационно-вязкого и поверхностного режимов. Безусловно, данная модель обладает значительным количеством упрощений и приближений, но величины, полученные из данных закономерностей, коррелируют с экспериментальными данными [28, 29].

Данные математического моделирования разливов могут быть использованы страховыми компаниями в рамках вычислений страховых премий, Росприроднадзором при калькуляции штрафов, а также иными надзорными ведомствами при андеррайтинге нефтегазовых арктических проектов.

### Список литературы

1. Бобылев С. Н. Цели устойчивого развития // Бюллетень Счетной палаты Российской Федерации. 2020. Т. 6, № 271. С. 92–94.
2. Бобылев С. Н., Григорьев Л. М. В поисках новых рамок для Целей устойчивого развития после Covid-19: страны БРИКС // Научные исследования экономического факультета. Электронный журнал экономического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. 2021. Т. 13, № 1. С. 25–51. DOI: <https://doi.org/10.38050/2078-3809-2021-13-1-25-51>
3. Ергин Д. Добыча. Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть. Москва: Альпина Паблишер, 2020. 944 с.
4. Алимов А. А., Шестакова А. И. Экологическая дипломатия в XXI веке // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 2. С. 97–101.
5. Мировая климатическая повестка: экономические вызовы для России от введения Евросоюзом углеродного налога / О. Е. Медведева, С. В. Соловьева, А. В. Стеценко // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2021. № 2. С. 39–52.
6. Regional Priorities of Green Economy / С. Н. Бобылев, О. В. Кудрявцева, Е. Ю. Яковлева // Экономика региона. 2015. № 2. С. 148–159. DOI: <https://doi.org/10.17059/2015-2-12>
7. Меньшиков В. В., Меньшикова О. В. Экологическая ответственность и экологическое страхование // Вестник Международной академии наук. Русская секция. 2012. № 2. С. 36–41.
8. Бюджет для граждан. К Федеральному закону о федеральном бюджете на 2021 год и на плановый период 2022 и 2023 годов // Официальный сайт Министерства финансов РФ. URL: <https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2020/12/main/2021-2023.pdf> (дата обращения: 20.06.2022).
9. Экономическая оценка минерально-сырьевого потенциала арктических территорий Республики Коми / И. Г. Бурцева, Т. В. Тихонова, И. Н. Бурцев // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 1. С. 87–98. DOI: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-87-98>



10. Predictive evaluation of the extent of the surface spreading for the case of accidental spillage of oil on ground / S. Grimaz, S. Allen, J. Stewart, G. Dolcetti. Selected Paper IcheaP8, AIDIC Conference series. 2007. Vol. 8. Pp. 151–160.
11. Fay J. A. Physical processes in the spread of oil on a water surface // International Oil Spill Conference Proceedings. 1971. № 1. Pp. 463–467. DOI: <https://doi.org/10.7901/2169-3358-1971-1-463>
12. Кудрявцева О. В., Попова А. А. Снижение экологических ущербов в энергетическом комплексе посредством определения масштабов загрязнения от разливов нефти на нефтепроводах // Государственное управление. Электронный вестник. 2016. № 64. С. 45–55.
13. Кудрявцева О. В., Попова А. А. Основные проблемы экологического страхования в России и пути их решения // Государственное управление. Электронный вестник. 2018. № 69. С. 1–12.
14. Попова А. А. Проблемы страхования ответственности за загрязнение окружающей среды в российском нефтегазовом секторе // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2019. № 4. С. 160–175.
15. Красильников П. А., Середин В. В. Изучение закономерностей и построение математических моделей распределения углеводородов по разрезу на территориях нефтеперерабатывающих предприятий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 2. С. 191–200. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.2.10>
16. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. Москва: Недра, 1982. 211 с.
17. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. Москва: Наука, 1977. 664 с.
18. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский и др. Москва: Изд-во Московского университета, 2005. 1024 с.
19. Fay J. A. The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea // Oil on the Sea, Plenum Press / D. P. Hoult (Ed.). New York, 1969. Pp. 53–63.
20. Манита Л. А. Условия оптимальности в конечномерных нелинейных задачах оптимизации: учебное пособие. Москва: Московский государственный институт электроники и математики, 2010. 84 с.
21. Киушкина В. И., Родичкин И. А. Арктические стратегии: энергетика, безопасность, экология, климат. Т. 1. Москва: МШУ «Сколково», 2020. 283 с.
22. Чернова Е. Г., Разманова С. В. Структурные сдвиги в нефтегазовой отрасли: ключевые факторы, индикаторы, последствия // Вестник СПбГУ. Экономика. 2017. Т. 33, Вып. 4. С. 622–640. DOI: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.406>
23. Кижаяева А. В. Обеспечение экологической безопасности арктических регионов как важный вектор российской политики // Актуальные проблемы современных международных отношений. 2016. № 7. С. 29–37.
24. Цены на нефть: анализ, тенденции, прогноз / В. В. Бушуев, А. А. Конопляник, Я. М. Миркин и др. Москва: ИД «Энергия», 2013. 344 с.
25. Яндекс Курс. Электронный ресурс. URL: <https://yandex.ru/news/quotes/1> (дата обращения: 29.06.2022).
26. Lee N. How negative oil prices revealed the dangers of the futures market // CNBC e-journal. 16.06.2020. URL: <https://www.cnbc.com/amp/2020/06/16/how-negative-oil-prices-revealed-the-dangers-of-futures-trading.html> (дата обращения: 26.03.2022).
27. Развитие альтернативной энергетики в России в контексте формирования модели низкоуглеродной экономики / О. В. Кудрявцева, Е. Н. Митенкова, О. И. Маликова, М. С. Головин // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. 2019. № 4. С. 122–139.
28. Моделирование поведения возможных разливов нефти при эксплуатации МЛСП «Приразломная». Оценка возможности ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с разливами нефти // Официальный сайт Международного фонда дикой природы. URL: [https://wwf.ru/upload/iblock/823/arctic\\_oil\\_spills\\_modeling\\_rus.pdf](https://wwf.ru/upload/iblock/823/arctic_oil_spills_modeling_rus.pdf) (дата обращения: 20.06.2022).
29. Павленко В. И., Муангу Ж. Актуальные проблемы предотвращения, ликвидации разливов нефти в Арктике и методы оценки экологического ущерба прибрежным территориям // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19).

## References

1. Bobylev, S. N. (2020). Targets of sustainable development. *Bulletin of the Auditing Chamber of the Russian Federation*, 6, 271 (in Russ.).
2. Bobylev, S. N., Grigoriev, L. M. (2021). In search of the contours of the post-COVID Sustainable Development Goals: The case of BRICS. *Scientific Research of Faculty of Economics. Electronic Journal*, 13 (1), 25–51 (in Russ.). <https://doi.org/10.38050/2078-3809-2021-13-1-25-51>
3. Yergin, D. (2020). *Excavation. World history of struggle for oil, money, and power*. Moscow, Alpina Publisher (in Russ.).



4. Alimov, A. A., Shestakova, A. I. (2017). Ecological diplomacy in the 21<sup>st</sup> century. *Society. Environment. Development*, 2, 97–101 (in Russ.).
5. Medvedeva, O. E., Solovyova, S. V. Stetsenko, A. V. (2021). World climate agenda: economic challenges for Russia from the European Union implementation of carbon tax. *Property Relations in the Russian Federation*, 2, 39–52 (in Russ.).
6. Bobylev, S. N., Kudryavtseva, O. V., Yakovleva, Y. Y. (2015). Regional Priorities of Green Economy. *Economy of Regions*, 2, 148–159.
7. Menshikova, O. V., Menshikov, V. V. (2012). Environmental Responsibility and Environmental Insurance. *Herald of the International Academy of Science. Russian Section*, 2, 36–41 (in Russ.).
8. Budget for citizens. To the Federal Law on federal budget for 2021 and the planned period of 2022 and 2023. *Official website of the Ministry of Finance of the Russian Federation* (in Russ.). <https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2020/12/main/2021-2023.pdf>
9. Burtseva, I. G., Tikhonova, T. V., Burtsev, I. N. (2022). Economic assessment of mineral resource potential of the Komi Republic Arctic territories. *Arctic: Ecology and Economy*, 12 (1), 87–98 (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-87-98>
10. Grimaz, S., Allen, S., Stewart, J., Dolcetti, G. (2007). Predictive evaluation of the extent of the surface spreading for the case of accidental spillage of oil on ground. *Selected Paper IcheaP8, AIDIC Conference series*, 8, 151–160.
11. Fay, J. A. (1971). Physical processes in the spread of oil on a water surface. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 1, 463–467. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-1971-1-463>
12. Kudryavtseva, O. V., Popova, A. A. (2016). Limiting the environmental damage in the energy industry via calculation of pollution levels from oil spills. *Public Administration. E-journal*, 64, 45–55 (in Russ.).
13. Kudryavtseva, O. V., Popova, A. A. (2018). Main Problems of Ecological Insurance in Russia and Ways to Solve Them. *Public Administration. E-journal*, 69, 1–12 (in Russ.).
14. Popova, A. A. (2019). Issues of Environmental Impairment Liability Insurance in the Russian Oil and Gas Industry. *Moscow University Economics Bulletin*, (4), 160–175 (in Russ.).
15. Krasilnikov, P. A., Seredin, V. V. (2017). Study of regularities and construction of mathematical models of hydrocarbon distribution in a section on territories of oil treatment enterprises. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 16 (2), 191–200 (in Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.2.10>
16. Barenblatt, G. I., Kolesnikov, V. M., Ryzhik, V. M. (1982). *Movement of liquids and gases in natural rocks*. Moscow, Nedra (in Russ.).
17. Polubarinova-Kochina, P. Ya. (1977). *Theory of movement of ground waters*. Moscow, Nauka (in Russ.).
18. Trofimov, V. T., Korolev, V. A. Voznesensky, E. A. et al. (2005). *Ground science*. Moscow, Izd-vo Moskovskogo universiteta (in Russ.).
19. Fay, J. A. (1969). The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. In D. P. Hoult (Ed.). *Oil on the Sea*, Plenum Press (pp. 53–63). New York.
20. Manita, L. A. (2010). *Conditions of optimality in finite-dimensional nonlinear optimization problems: tutorial*. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi institut elektroniki i matematiki (in Russ.).
21. Kiushkina, V. I., Rodichkin, I. A. (2020). *Arctic strategies: energy, safety, ecology, climate, 1*. Moscow, MShU “Skolkovo” (in Russ.).
22. Chernova, E. G., Razmanova, S. V. (2017). Structural shifts in oil and gas industry: Key factors, indicators, consequences. *St Petersburg University Journal of Economic Studies*, 33 (4), 622–640 (in Russ.). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.406>
23. Kizhaeva, A. V. (2016). Environmental security in the Arctic as an important vector of Russia’s policy. *Topical issues of contemporary international relations*, 7, 29–37 (in Russ.).
24. Bushuev, V. V., Konoplyanik, A. A., Mirkin, Ya. M. et al. (2013). *Oil prices: analysis, trends, forecast*. Moscow, ID “Energiya” (in Russ.).
25. *Yandex Quotes, Digital resource* (in Russ.). <https://yandex.ru/news/quotes/1>
26. Lee, N. (2020, June 16). How negative oil prices revealed the dangers of the futures market. *CNBC e-journal*. <https://www.cnbc.com/amp/2020/06/16/how-negative-oil-prices-revealed-the-dangers-of-futures-trading.html>
27. Kudryavtseva, O. V., Mitenkova, E. N., Malikova, O. I., Golovin, M. S. (2019). Development of alternative energy in Russia in the context of a low-carbon economy model. *Moscow University Economics Bulletin*, 4, 122–139 (in Russ.).
28. Modeling the probable oil spills during exploitation of “Prirazlomnaya” offshore ice-resistant oil-producing platform. Assessing the possibility to eliminate emergencies related to oil spills. *Official website of World Wildlife Fund* (in Russ.). [https://wwf.ru/upload/iblock/823/arctic\\_oil\\_spills\\_modeling\\_rus.pdf](https://wwf.ru/upload/iblock/823/arctic_oil_spills_modeling_rus.pdf)
29. Pavlenko, V. I., Muangu, Zh. (2015). Topical issues of preventing and eliminating oil spills in the Arctic and methods of assessing ecological damage to coastal territories. *Arctic: Ecology and Economy*, 3 (19) (in Russ.).



#### **Вклад авторов**

Е. В. Серебренников является главным исследователем; проводил обзор литературы; подготовил рукопись; осуществлял расчеты модели; интерпретировал результаты.

О. В. Кудрявцева направляла исследование; дополняла и корректировала обзор литературы; корректировала рукопись; интерпретировала результаты.

#### **The author's contribution**

E. V. Serebrennikov is the main researcher who carried out the research; performed the literature review; prepared the manuscript; performed calculations of the model; interpreted the results.

O. V. Kudryavtseva coordinated the research; complemented and corrected the literature review; corrected the manuscript; interpreted the results.

*Конфликт интересов:* один из авторов является членом редколлегии журнала *Russian Journal of Economics and Law*. Статья прошла рецензирование на общих основаниях.

*Conflict of Interest:* one of the authors is a member of the Editorial Board of the *Russian Journal of Economics and Law*. The article has been reviewed on the usual terms.

*Дата поступления / Received 27.04.2022*

*Дата принятия в печать после доработки / Date of acceptance for publication after finalization 02.07.2022*