

УДК 504.064

DOI: 10.15372/KhUR2020222

## Экологические риски нефтезагрязнения в арктической зоне

М. Н. АЛЕКСЕЕВА, Л. И. СВАРОВСКАЯ, И. Г. ЯЩЕНКО

*Институт химии нефти СО РАН,  
Томск (Россия)**E-mail: amn@ipc.tsc.ru*

### Аннотация

В решении экологических проблем загрязнения нефтью и нефтепродуктами Арктического шельфа актуально применение космических снимков, которые позволяют проводить мониторинговые наблюдения за состоянием нефтедобывающих территорий и своевременно выявить и оценить риски нефтяного загрязнения труднодоступных и уязвимых наземных тундровых и морских экосистем. На основе дистанционных и наземных данных построены зоны риска нефтезагрязнения на территории о-ва Колгуев. Рассмотрено экологическое состояние почв и прибрежной воды острова. С применением аборигенной психрофильной микрофлоры, стимулированной питательными минеральными субстратами, предложена технология очистки нефтезагрязненных участков.

**Ключевые слова:** космические снимки, арктическая зона, Баренцево море, подводные и наземные нефтепроводы, нефтеразливы, нефтезагрязнения, углеводороды, микрофлора, тундровые почвы

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с ростом потребности в углеводородном сырье и выработанностью континентальных месторождений особое место уделяется новым эффективным методам разведки и освоения минерально-сырьевой базы нефтегазового комплекса российского шельфа Арктики [1]. В настоящее время создаются и функционируют прибрежно-морские нефтегазодобывающие комплексы в районах с высокой концентрацией промышленных запасов углеводородов [1, 2]. Например, нефтегазодобывающий комплекс Печороморского и Южно-Баренцевского районов включает нефти Приразломного, Северо-Медынского, Северо-Гуляевского, Варандей-море, Поморского, Долгинского и Песчаноозерского месторождений с запасами углеводородов 600–700 млн т [3, 4].

Для континентальных арктических месторождений характерны сильная изношенность промыслового оборудования, коррозия и технологические дефекты нефтепроводов, что обу-

словливает возникновение экологических рисков на территориях нефтедобычи. В районах стационарных морских платформ море и прибрежные территории подвержены нефтяному загрязнению при разгрузке-погрузке танкеров и авариях на подводных нефтепроводах [5].

В решении экологических проблем актуально применение космических снимков (КС), которые позволяют проводить мониторинговые наблюдения за состоянием нефтедобывающих территорий Арктики. С использованием КС Landsat 8 проводится картографирование ареала распространения растительности, ее классификация, оценка площадей нарушенных земель, дешифрирование нефтеразливов на суше и море и идентификация действующих факельных установок [6, 7]. В современных условиях усовершенствованы методы обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности с использованием радиолокационных и космических снимков MODIS, Landsat 8, Sentinel в различных диапазонах длин волн [8, 9]. Оцениваются экологические риски, и создаются имитационные модели

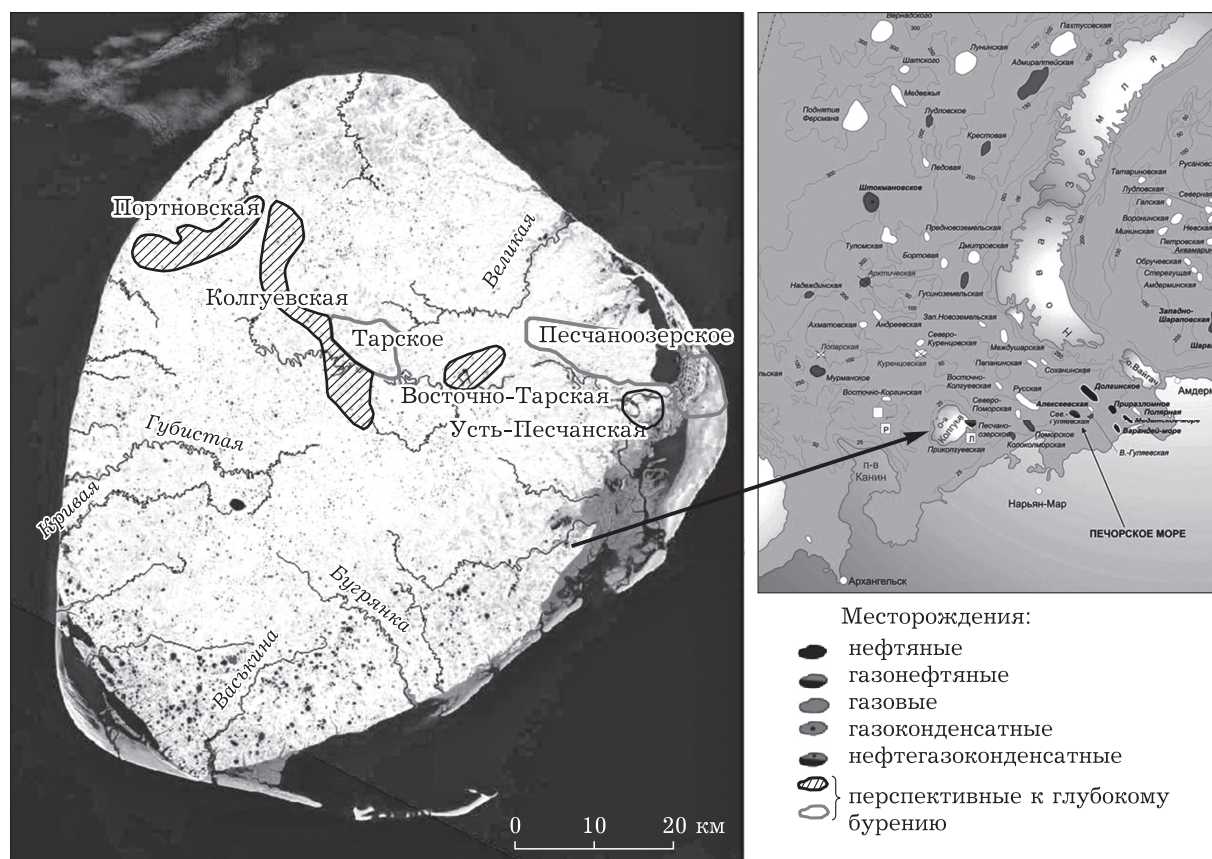


Рис. 1. Шельфовые месторождения Баренцева моря [14] с космическим снимком Landsat 8 территории о-ва Колгуев.

расчета объемов и площадей нефтезагрязнения воды [10, 11].

Северные месторождения Песчаноозерское и Тарское расположены на о-ве Колгуев в Баренцевом море на  $70^\circ$  с. ш. [12, 13]. Остров общей площадью  $5121.6 \text{ км}^2$  с уникальной природой, тундровыми ландшафтами и прибрежной морской акваторией расположен в юго-восточном районе Баренцева моря (рис. 1). По классификации ландшафтов о-в Колгуев представляет озерно-аллювиальную равнину с участием водно-ледниковых и биогенных озерно-болотных отложений. Преобладают суглинки, торф и песчаные почвы. Остров подвержен загрязнению нефтью и нефтепродуктами при разгрузке-погрузке нефтеналивных танкеров, при авариях на подводных и наземных нефтепроводах, на промысловом оборудовании [15].

Цель данной работы – выявление зон экологического риска нефтяного загрязнения о-ва Колгуев на основе дистанционных и наземных данных; разработка экологически безопасного метода восстановления нефтезагрязненных участков с применением аборигенной микрофлоры.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Песчаноозерское нефтегазоконденсатное месторождение относится к Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции [12]. Добыча нефти компанией “Арктикнефть” по данным 2014 г. составила 31 тыс. т [13]. Физико-химический состав образцов нефти представлен в табл. 1. Нефти легкие, с низким содержанием серы, смол и асфальтенов.

## Применение космических снимков

В работе применялись доступные в сети интернет КС Landsat 8 с датой съемки 11.07.2017 г. и продукт MCD43A4 от 22.09.2013 г. На основе ГИС-технологий с применением КС и данных наземных исследований выявлены следующие зоны риска загрязнения акватории и территории о-ва Колгуев нефтью и нефтепродуктами:

1. Зона загрязнения вокруг пос. Бугрино с прилегающим участком мелководья.
2. Зона нефтезагрязнения санитарно-защитных полос производственных объектов.

ТАБЛИЦА 1

Свойства образцов нефтей Песчаноозерского месторождения

| Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Вязкость при 20 °С,<br>мПа · с | Содержание, мас. % |       |            |      | Коксуемость,<br>мас. % |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------|------------|------|------------------------|
|                                 |                                | Парафин            | Смола | Асфальтены | Сера |                        |
| 0.7684                          | 5.03                           | —                  | 1.25  | —          | —    | —                      |
| 0.7713                          | —                              | —                  | 1.28  | —          | —    | —                      |
| 0.7951                          | —                              | —                  | 0.90  | —          | —    | —                      |
| 0.8366                          | —                              | 9.00               | 3.61  | 0.67       | —    | —                      |
| 0.7758                          | 2.07                           | 3.02               | 1.23  | —          | 0.04 | 0.14                   |
| 0.7760                          | 2.17                           | 4.60               | 0.53  | —          | 0.10 | —                      |
| 0.7872                          | —                              | —                  | —     | —          | 0.13 | —                      |
| 0.8260                          | —                              | 2.35               | 4.03  | —          | 0.35 | —                      |
| 0.8080                          | 5.27                           | 3.50               | 2.83  | 0.72       | 0.13 | —                      |
| 0.7684                          | —                              | —                  | 1.25  | —          | —    | —                      |

Примечание. Прочерк — нет данных.

3. Зона загрязнения нефтепродуктами прибрежной акватории Баренцева моря.

#### Лабораторные исследования

В 2014 г. в результате экспедиционных исследований в зоне береговой линии вблизи пос. Бугрино были отобраны образцы нефтезагрязненной почвы, проведен их физико-химический и микробиологический анализ.

Из полученных образцов почв выделены активные штаммы микроорганизмов, толерантные к низким температурам. Таксономическую принадлежность чистых культур определяли по морфологическим признакам методом микроскопии, сахаролитические свойства — по справочным данным. Для определения галофильных свойств исследуемых штаммов применяли среду с повышенным содержанием NaCl (50 г/дм<sup>3</sup>).

Процессы биодеструкции проводили в течение 60 сут при температуре +10 °С выделенными штаммами микроорганизмов на жидкой среде Мюнца и в нефтезагрязненной почве естественной микрофлорой. Для стимуляции деструктивных процессов применяли питательный суб-

страт: 1 % раствор аммиачной селитры с добавлением 0.1 % раствора MgSO<sub>4</sub>.

Концентрацию исходной и остаточной нефти определяли гравиметрическим методом. Экстрагированные нефти анализировали методом ИК-Фурье спектроскопии. Спектры образцов регистрировали в области 400–4000 см<sup>-1</sup> в тонком слое на ИК-Фурье спектрофотометре Nikolet 5700 с Raman-модулем (Thermo Electron Corporation, США).

Характеристичными показателями для сравнения степени биodeградации нефтей выступают относительные величины — спектральные коэффициенты, рассчитываемые по соотношению оптических плотностей (*D*) полос поглощения в определенной области ИК-спектров. По данным ИК-спектроскопии рассчитывали биодеструктивные изменения спектральных коэффициентов и группового состава нефти, которые подтверждают каталитическую активность микрофлоры. В табл. 2 представлены спектральные коэффициенты — степени ароматичности (*C*<sub>1</sub>), алифатичности (*C*<sub>2</sub>), разветвленности (*C*<sub>p</sub>) и окисленности (*C*<sub>o</sub>) углеводородов нефти, отражающие ферментативную активность

ТАБЛИЦА 2

Спектральные коэффициенты исследуемых образцов нефти

| Исследуемые образцы нефти                              | Спектральные коэффициенты                                                    |                                                                                                          |                                                                               |                                                                               |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | <i>C</i> <sub>1</sub> ( <i>D</i> <sub>1600</sub> / <i>D</i> <sub>723</sub> ) | <i>C</i> <sub>2</sub> ( <i>D</i> <sub>1465</sub> + <i>D</i> <sub>1377</sub> / <i>D</i> <sub>1600</sub> ) | <i>C</i> <sub>p</sub> ( <i>D</i> <sub>1377</sub> / <i>D</i> <sub>1465</sub> ) | <i>C</i> <sub>o</sub> ( <i>D</i> <sub>1700</sub> / <i>D</i> <sub>1465</sub> ) |
| Контроль (“чистая” нефть)                              | 0.25                                                                         | 4.33                                                                                                     | 0.24                                                                          | 0.06                                                                          |
| После биодеструкции в почве ассоциацией бактерий       | 1.35                                                                         | 7.28                                                                                                     | 0.59                                                                          | 1.28                                                                          |
| После биодеструкции бактериями рода <i>Pseudomonas</i> | 0.96                                                                         | 5.27                                                                                                     | 0.51                                                                          | 0.85                                                                          |

бактерий и определенные согласно методике, приведенной в [16]. Например, степень ароматичности  $C_1$  рассчитывается как соотношение оптических плотностей полос поглощения 1600 и 723  $\text{см}^{-1}$  ( $C_1 = D_{1600}/D_{723}$ ). Полоса поглощения 1600  $\text{см}^{-1}$  соответствует валентным колебаниям связей C=C ароматических структур, а полоса 723  $\text{см}^{-1}$  характеризует метиленовую группу  $(-\text{CH}_2-)_n$  в парафиновых углеводородах, содержащих метиленовую цепочку с  $n > 4$ .

Методом хроматографического разделения проводили индивидуальный анализ ациклических насыщенных углеводородов и рассчитывали некоторые биомаркеры, определяющие глубину деструктивных изменений в составе углеводородов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построена карта-схема указанных зон риска нефтезагрязнения территории и акватории о-ва

Колгуев (рис. 2). В зоне риска вокруг пос. Бугрино с прилегающим мелководьем площадью 2,5  $\text{км}^2$  периодически происходят разливы нефти и нефтепродуктов во время их транспортировки в поселок с Песчаноозерского месторождения для нужд местного жилищно-коммунального сектора (см. рис. 2, точка 3). Например, по данным [15] от 18.09.2004, при перевозке дизельного топлива в результате аварии на мелководье вблизи о-ва Колгуев (пос. Бугрино) утонул понтон с 50 т солярки.

Концентрация загрязнения исследуемых образцов почвы определена в интервале 18–57 г/кг. В результате скрининга коллекционных культур, выделенных из почвы, определены штаммы микроорганизмов – представителей родов *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus* и *Rhodococcus*. Особым разнообразием, включающим до 6 видов, характеризуется род *Bacillus*. При проведении деструкции в жидкой среде наиболее эффективно утилизация нефти про-



Рис. 2. Карта растительного покрова о-ва Колгуев с зонами экологического риска загрязнения нефтью и нефтепродуктами. Обозначения: 1 и 2 – подводные нефтепроводы; 3 – точка наземных исследований, отбор проб почвы; 4 – нефтяное пятно от разлива 21.09.2013.

шла в опыте с применением ассоциации микроорганизмов и штаммов культур *Pseudomonas* и *Bacillus*.

На основе использования аборигенной микрофлоры авторами разработан метод ремедиации и восстановления нефтезагрязненных почв с применением минеральных стимулирующих субстратов. Применение аборигенной нефтеокисляющей микрофлоры позволяет сохранять естественный почвенный биоценоз северных широт [17]. Ремедиация углеводородов нефти составила 36–60 % при низкой температуре (+5 °C). Повышение коэффициентов ароматичности ( $C_1$ ) и алифатичности ( $C_2$ ) после биодеструкции в контакте с ассоциацией и отдельной чистой культурой способствовало проявлению психротолерантных и галофильных свойств, что указывает на активную биодеструкцию алканов и ароматических углеводородов (см. табл. 2). Повышение коэффициента разветвленности ( $C_p$ , соотношение метильных и метиленовых групп) свидетельствует о деструкции углеводородов, содержащих метиленовые группы. Повышение коэффициента окисленности ( $C_o$ ) подтверждает ферментативную активность выделенных культур в процессах биодеструкции в условиях низкой температуры и повышенной минерализации.

Количественный анализ утилизации различных фракций углеводородов при низкой положительной температуре показал, что наиболее активным деструктором служит ассоциация бактерий, при использовании которой коэффициент окисленности  $C_o$  достигает значения 1.28. В случае применения чистой культуры рода *Pseudomonas*  $C_o$  ниже и составляет 0.85 (см. табл. 2).

Площадь зоны риска нефтезагрязнения санитарно-защитных полос производственных объектов Песчаноозерского месторождения составила 31 км<sup>2</sup> (см. рис. 2). Согласно нормативным документам, санитарно-защитная зона (СЗЗ) по обеим сторонам нефтепровода составляет 100 м, вокруг нефтедобывающих скважин – 300 м, для резервуарного парка – 150 м [18, 19]. По данным 2015 г., на Песчаноозерском месторождении пробурено 64 скважины, из которых действующих добывающих – 24, нагнетательных – 7, остальные скважины либо в консервации, либо ликвидированы. В границах СЗЗ скважин на пяти (из 24) в почвах были обнаружены превышения ПДК нефтепродуктов. Очень высокой степенью загрязнения нефтепродуктами отличаются грунты амбаров и возле цистерн на площадках

буровых скважин – в семи случаях значения превышали 5000 мг/кг (ПДК нефти и нефтепродуктов в почвах равна 1000 мг/кг). Однако на фоновых участках острова содержание нефтяных углеводородов составляет 7–230 мг/кг [20].

В акватории острова на глубинах 14 и 18 м расположено два подводных нефтепровода для загрузки танкеров вместимостью до 30 000 т, что повышает риск загрязнения морской воды (см. рис. 2, точки 1 и 2). С использованием дистанционных данных продукта MCD43A4 (дата съемки 22.09.2013) севернее морского нефтеналивного терминала о-ва Колгуев картировано нефтяное пятно (см. рис. 2) площадью около 20 км<sup>2</sup>. Действительно, по данным [21] от 21 сентября 2013 г., в результате аварии в море вылилось около 200 л дизельного топлива. На 26 сентября 2013 г. море в месте разлива очистилось. Размер нефтяного пятна и его самоликвидация определяются ветровым перемешиванием, инсоляцией и температурой воздуха. По данным метеостанции о-ва Колгуев, с 21 по 26 сентября ветер был преимущественно восточного направления со средней скоростью 12 м/с, температура воздуха 5 °C. Модуль средней скорости течений Печорского моря имел значения 2.6–4.8 см/с в направлении на северо-восток (от 30 до 70°) и характеризовал вынос вод в направлении “Поморский пролив – пролив Карские Ворота” [22].

В целом, без аварийных разливов нефти суммарное содержание нефтепродуктов в поверхностном слое вод в Печорском море ниже ПДК (50 мкг/л). Эти воды характеризуют как слабозагрязненные нефтепродуктами [23].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе дистанционных и наземных данных построены зоны экологического риска загрязнения нефтью территории и акватории о-ва Колгуев. Наибольший уровень нефтезагрязнения относится непосредственно к территории нефтедобычи Песчаноозерского месторождения. Однако нередко в результате аварий происходят загрязнения прибрежной зоны острова (например, разливы при транспортировке дизельного топлива в 2004 и 2013 гг.). В результате проведенных анализов нефтезагрязненной почвы в условиях низких температур выделена микрофлора, обладающая психротолерантными и галофильными свойствами, на основе которой разработан биопрепарат для рекультивации неф-

тезагрязненных почв в условиях низких температур и повышенной минерализации. Для интенсификации процессов деструкции нефти рекомендуем применять аммиачную селитру, содержащую азотистые биогенные субстраты.

Предложенная методика с применением дистанционных и наземных данных позволяет выявлять зоны экологического риска нефтезагрязнения арктических территорий и составлять план профилактических и рекультивационных мероприятий.

Работа выполнена по Проекту НИР ПФНИ ГАН на 2013–2020 гг. V.46.1.2. “Диагностика состояния и восстановление природных экосистем на объектах нефтегазового комплекса Западной Сибири и прилегающих территориях” № ГР АААА-А17-117030310200-4.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/96681/> (дата обращения: 17.11.2019).
- 2 Север и Арктика в новой парадигме мирового развития: актуальные проблемы, тенденции, перспективы. Научно-аналитический доклад. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. 420 с.
- 3 Дмитриевский А. Н., Белонин М. Д. Перспективы освоения нефтегазовых ресурсов российского шельфа // Природа. 2004. № 9. С. 3–10.
- 4 Яценко И. Г. Особенности свойств арктической трудноизвлекаемой нефти Сибири // Химия уст. разв. 2019. Т. 27, № 1. С. 105–113.
- 5 Углеводородные проекты на российском Арктическом шельфе: инвестиционные риски [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.greenpeace.org/russia/ru/news/2012/16\\_04\\_12\\_investments\\_risks\\_report/](https://www.greenpeace.org/russia/ru/news/2012/16_04_12_investments_risks_report/) (дата обращения 17.11.2019).
- 6 Лавриненко И. А. Типологическая схема территориальных единиц растительности на примере острова Колгуев // Сб. науч. тр. ГНБС. 2016. № 143. С. 86–94.
- 7 Алексеева М. Н., Яценко И. Г. Алгоритм детектирования факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа и оценка объемов выбросов вредных веществ // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 6. С. 490–494.
- 8 Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
- 9 Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 130–149.
- 10 Arzaghi E., Abbassi R., Garaniyaa V., Binns J., Khan F. An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline // Marine Pollution Bulletin. 2018. Vol. 135. P. 1117–1127.
- 11 Sun S., Hu C., Tunnell J. W. Surface oil footprint and trajectory of the Ixtoc-I oil spill determined from Landsat/MSS and CZCS observations // Marine Pollution Bulletin. 2015. Vol. 101, No. 2. P. 632–641.
- 12 Государственная геологическая карта РФ М 1:1 000 000. Карта полезных ископаемых и прогноза нефтегазоносности. R-38-40 (о. Колгуев). 2001 г.
- 13 Блох С. С., Цыганков В. А., Алексеева Ю. В., Ефимова Г. Х., Андреева О. Я. Повышение эффективности разработки Песчаноозерского нефтегазоконденсатного месторождения на о. Колгуев в Баренцевом море // Актуальные проблемы нефти и газа. 2016. № 3 (15). С. 7.
- 14 Дмитриевский А. Н. Ресурсно-инновационное развитие экономики России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/371165/> (дата обращения 17.11.2019).
- 15 Бамбуляк А., Францен Б. Транспортировка нефти из российской части Баренцева региона. Сванховд, 2005. 92 с.
- 16 Сваровская Л. И., Филатов Д. А., Гэрэлмаа Т., Алтунина Л. К. Оценка степени биодеструкции нефти методами ИК и ЯМР спектроскопии // Нефтехимия. 2009. Т. 49, № 2. С. 153–158.
- 17 Сваровская Л. И., Яценко И. Г. Активность микрофлоры нефтезагрязненных почв на территории нефтедобывающего комплекса // Экол. вестн. России. 2019. № 6. С. 24–27.
- 18 Постановление от 25 сентября 2007 г. № 74 “О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПин 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов»” [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/12158477/> (дата обращения 17.11.2019).
- 19 Демидова И. В., Ельшанова Е. В. Разработка проектов санитарно-защитных зон объектов с учетом новых требований законодательства // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. № 3. С. 76–79.
- 20 Отчет по договору на выполнение научно-технических работ по проекту ЭКОРА “Разработка эколого-экономического обоснования создания особо охраняемой природной территории (ООПТ) на острове Колгуев”. СПб., 2009. 83 с.
- 21 В НАО 200 литров дизельного топлива вылилось в море [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://xn--29-jlc9a.xn--p1ai/?p=24059> (дата обращения 17.11.2019).
- 22 Рожков В. А., Сухих Н. А. Изменчивость течений в Печорском море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1. С. 84–95.
- 23 Щитов Б. В., Шадский И. П., Лобковский Л. И., Кучерук Н. В., Мерклин Л. Р. Исследования экологической ситуации в районе Приразломного нефтяного месторождения // Нефтяное хозяйство. 2005. № 6. С. 34–37.