

## МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОБЪЕКТАХ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ПО ДАННЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

О. В. Григорьева, А. В. Марков, М. О. Иванец, В. В. Терентьева

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 30 августа 2017 г.

---

*Рассмотрена методика оценки экологической обстановки, позволяющая производить ранжирование обследованных территорий на основе комплексного учета показателей экологической устойчивости и антропогенной нагрузки, количественные значения которых определяются при обработке материалов аэрокосмической съемки. Представлены примеры практической реализации методики при проведении авиационного экологического мониторинга объектов, расположенных в Арктической зоне.*

**Ключевые слова:** аэрокосмическая съемка, устойчивость экосистемы, антропогенная нагрузка, оценка экологической обстановки.

### Введение

Низкая устойчивость северных территорий к антропогенным воздействиям, обусловленная экстремальными природно-климатическими факторами, определяет важность формирования эффективной системы наблюдений за состоянием окружающей среды в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). Особую актуальность мониторинг арктических экосистем приобретает в условиях масштабных работ по освоению нефтегазовых ресурсов на шельфе и созданию новых торговых морских путей, а также ввиду необходимости контроля экологической обстановки на многочисленных заброшенных объектах (в поселках, на рудниках, аэродромах, складах горюче-смазочных материалов и др.), которым в результате хозяйственной деятельности в прошлом был нанесен экологический ущерб.

Труднодоступность и большая площадь территорий определяют приоритетность использования для экологических обследований арктических регионов авиационных и космических средств

дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), с помощью которых возможно идентифицировать достаточно широкий спектр типовых загрязнений почв, растительности и водных объектов. При обработке материалов аэрокосмической съемки решаются задачи классификации обнаруженных негативных воздействий, расчета их основных характеристик (координат, площади, концентрации и др.) и предварительного прогноза размера вреда, нанесенного окружающей среде.

Вместе с тем традиционно применяемые при анализе данных ДЗЗ методические подходы ориентированы, как правило, на получение частных показателей, характеризующих выявленные нарушения, и не позволяют перейти к интегральным оценкам экологического состояния обследованной территории. Наличие такой обобщенной информации, учитывающей не только уровень антропогенного воздействия, но и способность экосистемы ему противостоять, необходимо для установления степени

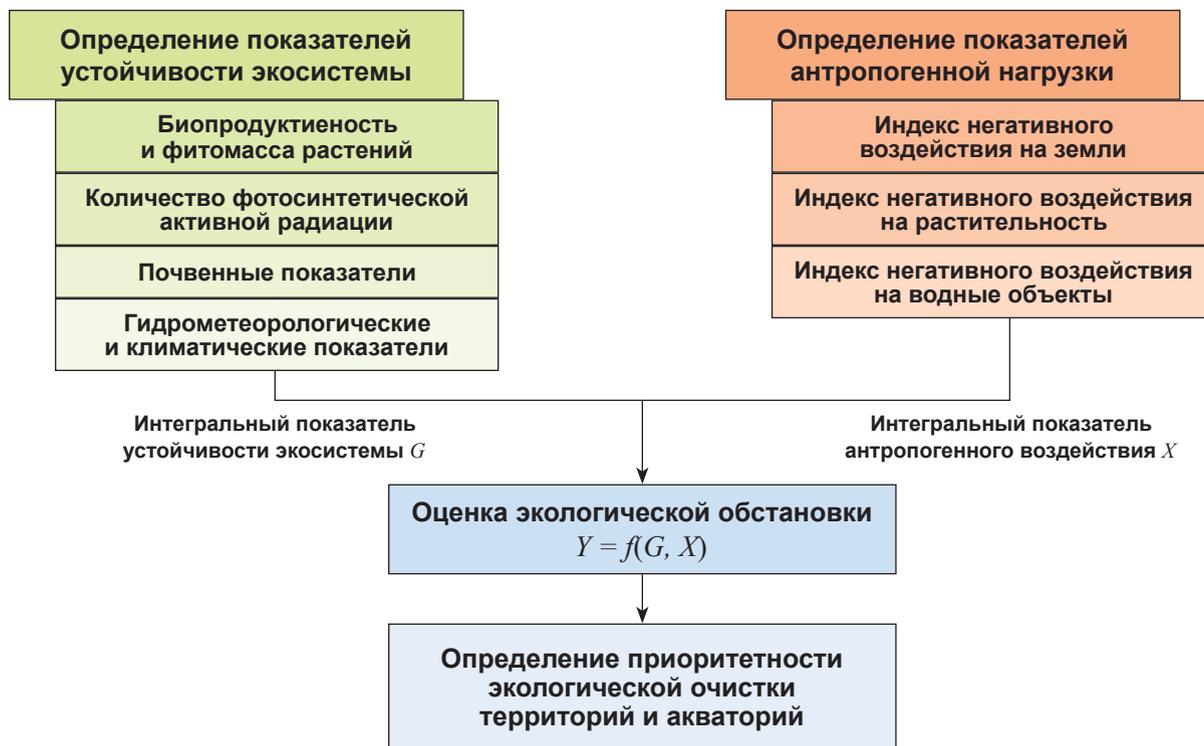


Рис. 1. Методика оценки экологической обстановки с учетом физико-географических условий местности

опасности наблюдаемых негативных изменений природной среды и, как следствие, для принятия решений о срочности и очередности восстановительных работ.

В статье описывается методика, позволяющая по результатам обработки материалов аэрокосмической съемки комплексно оценивать текущую экологическую обстановку на контролируемых территориях, а также приводятся примеры ее практической реализации, полученные в ходе экологического мониторинга объектов, расположенных в Мурманской и Архангельской областях.

Важно отметить, что на значительные области АЗРФ уже существуют базы данных актуальных материалов космической съемки<sup>1</sup>, высокая детальность которых позволяет использовать их в рассматриваемой методике. При этом снимки отечественного космического аппарата (КА) «Ресурс-П» (пространственное разрешение 1,0 м) распространяются в интересах российских потребителей бесплатно. Стоимость имеющих еще более высокую детальность (0,3 м) изображений с американского коммерческого КА WorldView-3 составляет за 1 км<sup>2</sup> от 30 долл. для архивной съемки (минимальная площадь заказа — 25 км<sup>2</sup>) и от 50 долл. для актуальной съемки (минимальная площадь заказа — 100 км<sup>2</sup>). Применение авиационных носителей в Арктике наиболее целесообразно либо при оперативном контроле районов чрезвычайных ситуаций, либо при

необходимости сверхвысокодетальной съемки отдельных объектов. Такого рода аэросъемочные работы в АЗРФ на плановой основе осуществляют наиболее крупные природопользователи (Минобороны России, ПАО «Газпром» и др.) в рамках производственного экологического контроля.

### Методика комплексной оценки экологической обстановки по данным аэрокосмической съемки

Обобщенный анализ экологического состояния территорий предусматривает исследование потенциальной способности экосистемы противостоять негативным воздействиям и прогноз реакции окружающей среды на существующую антропогенную нагрузку. В соответствии с этим подходом в методике комплексного оценивания экологической обстановки можно выделить три основных этапа (рис. 1):

- определение показателей экологической устойчивости территории, зависящих от физико-географических условий местности;
- выявление уровня существующей нагрузки на экосистему, вызванной влиянием антропогенных объектов, а также негативными изменениями в растительности, загрязнением земель и водоемов;
- обобщенную оценку экологической обстановки.

В качестве исходных данных для определения ряда показателей экологической устойчивости и антропогенной нагрузки могут использоваться материалы аэрокосмической съемки, при дешифрировании которых идентифицируются как различные

<sup>1</sup> <http://catalog.sovzond.ru>.

нарушения окружающей среды, так и природные компоненты, являющиеся индикаторами способности экосистемы к самовосстановлению. На снимках интересующие объекты выявляются по своим спектрально-яркостным и/или пространственно-частотным характеристикам либо визуально, либо в автоматизированном режиме с помощью специализированных методов и программ обработки данных ДЗЗ [1—5]. При этом эффективность процесса распознавания существенно зависит от информационных параметров анализируемых съемочных материалов (прежде всего спектрального диапазона и пространственного разрешения). Важным фактором для обеспечения качественных результатов является также правильное планирование обследования, заключающееся в выборе оптимальных для проведения съемки сезона года (лето — период с наибольшим световым днем и возможностью при отсутствии снега объективно оценить состояние растительности, земель и водных объектов), времени суток (полуденное время с наилучшей освещенностью наблюдаемой сцены) и метеоусловий (отсутствие облачности).

#### Определение показателей экологической устойчивости

При анализе физико-географических условий, влияющих на устойчивость экосистем к техногенным воздействиям и их способность к самовосстановлению, используют три группы показателей, позволяющих установить допустимую меру антропогенного вмешательства:

- буферные (геолого-морфологические — преобладающий тип почв и грунтов, толщина плодородного слоя почвы, степень заболоченности и увлажненности, рельеф);
- регенеративные (климатические и гидрологические факторы);
- адаптационные (репродуктивные свойства растительности — структура и видовое разнообразие растительного покрова, степень преобразованности естественного ценоза, фитомасса, биопродуктивность).

К наиболее важным показателям, определяемым по данным ДЗЗ, относятся биопродуктивность  $NPP$ , т/(га·год), и фитомасса  $P$ , т/га.

Для расчета биопродуктивности используется формула [7]

$$NPP = fPAR \cdot PAR \cdot LUE \cdot R,$$

где  $fPAR$  — индекс фотосинтетической активной радиации, поглощаемой растительностью [7];  $PAR = 0,48E$  — энергия солнечной радиации у Земли, используемая зелеными растениями для фотосинтеза в диапазоне 0,4—0,7 мкм;  $E$  — приходящая на Землю солнечная радиация, Дж/(м<sup>2</sup>·сут);  $LUE$  — коэффициент эффективности преобразования солнечной радиации в углерод;  $R$  — коэффициент автономного дыхания растений.

$$fPAR = 0,95 \frac{(W - W_{02})}{(W_{98} - W_{02})},$$

где  $W = \frac{(1 + NDVI)}{(1 - NDVI)}$ ;  $W_{02}$ ,  $W_{98}$  — коэффициенты  $W$

для земель, лишенных растительности и полностью покрытых растительным покровом соответственно;  $NDVI$  — вегетационный индекс, определяемый по значениям коэффициентов спектральной яркости растительности в интервалах спектра 0,63—0,69 и 0,75—0,90 мкм.

Коэффициент  $LUE$  вычисляется по вегетационному индексу  $NDVI$ , рассчитанному по значениям коэффициентов спектральной яркости растительности в интервалах спектра 0,75—0,90 и 1,55—1,75 мкм, и минимальным, максимальным и оптимальным значениям температур для фотосинтеза, которые могут быть получены из справочной литературы для каждого вида растительности и условий произрастания [8]. При отсутствии этих данных  $LUE$  принимается равным  $6,5 \cdot 10^{-8}$  г/Дж.

Фитомасса отражает адаптационные возможности экосистемы к стрессовым нарушениям за счет накопления энергии в массе растений. Для нелесных арктических территорий с кустарниковой и кустарничковой тундрой величину  $P$  определяют через вегетационные индексы, рассчитанные в красном и ближнем инфракрасном каналах в пределах области спектра 0,62—0,75 мкм, соответствующей полосе поглощения фотосинтетически активной радиации.

Установив по данным аэрокосмической съемки значения биопродуктивности и фитомассы, возможно получить интегральную оценку экологической устойчивости территории с помощью показателя, определяемого из уравнения энергетического баланса растений [9]:

$$G = \frac{P \cdot NPP}{PAR \cdot fPAR},$$

где величины  $NPP$  и  $P$  задаются в энергетическом выражении, МДж/м<sup>2</sup>.

Показатель  $G$  показывает, что экосистема характеризуется наибольшей устойчивостью в том случае, если она максимально использует энергию, поступающую на поверхность Земли, для восстановления своих свойств за счет накопленной фитомассы. Величина  $G$  близка к единице для территорий с высокой адаптационной способностью и низким уровнем влияния антропогенного воздействия. В зависимости от значения этого показателя экосистемы подразделяются по уровню устойчивости на четыре класса: крайне высокая — более 0,8, высокая — 0,55—0,8, средняя — 0,30—0,55, низкая — менее 0,3.

*Определение показателей антропогенной нагрузки*

Показатели антропогенной нагрузки оцениваются на основе характеристик выявленных негативных воздействий и отражают уровень соотношения между величиной воздействия и естественным состоянием окружающей среды.

Частные показатели рассчитываются для каждого  $k$ -го компонента природной среды (водоемов, земель или растительности) в виде следующего индекса:

$$X_k = \frac{\sum_{i=1}^n w_i S_i}{S_{обк}}$$

где  $w_i$  — весовой коэффициент, соответствующий степени опасности конкретного  $i$ -го воздействия для окружающей среды и здоровья человека;  $S_i$  — площадь  $i$ -го участка водоемов, земель или растительности, подвергшегося антропогенному воздействию, м<sup>2</sup>;  $S_{обк}$  — общая площадь  $k$ -го компонента природной среды, м<sup>2</sup>.

Способы определения весовых коэффициентов  $w$  зависят от вида негативного воздействия. Например, для свалок степень опасности может характеризоваться показателем антропогенной нагрузки  $D$ , задаваемым выражением

$$D = K_s K_G C_D,$$

где  $K_s$  — коэффициент, значение которого (от 1 до 5) зависит от площади свалки;  $K_G$  — коэффициент размещения отходов, зависящий от категории и целевого назначения земель и определяемый в соответствии с «Методикой исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды», утвержденной приказом Минприроды России от 8 июля 2010 г. № 238;  $C_D$  — коэффициент, учитывающий класс опасности основных для данной свалки отходов (для чрезвычайно опасных отходов равен 5, для высокоопасных — 4, для умеренно опасных — 3, для малоопасных — 2, для практически неопасных — 1).

В зависимости от величины  $D$  свалки классифицируются следующим образом: 1—10 — относительно неопасная ( $w = 1$ ), 10—20 — потенциально опасная ( $w = 2$ ), 20—30 — опасная ( $w = 3$ ), 30—40 — очень опасная ( $w = 4$ ), 40—50 — высокой степени опасности ( $w = 5$ ).

Для тундровой растительности в качестве  $w$  принимается степень повреждения покрова, которая выражается через вегетационные индексы.

Применительно к водным объектам, загрязненным взвешенными веществами,  $w$  рассчитывается как отношение фактической концентрации взвеси к допустимой или фоновой концентрации для данного водоема. Степень опасности пленок нефтепродуктов, разлитых на водной поверхности, соотносится с их удельной массой.

Интегральный индекс антропогенной нагрузки  $X$  на экосистему в целом рассчитывается с учетом всех покомпонентных оценок  $X_k$  с помощью диаграммного метода [10]. Для объединения нескольких различных показателей в единый индекс  $X$  могут использоваться и другие методы многоатрибутного принятия решений по управлению экологическими системами [11; 12]. В зависимости от значения индекса исследуемая территория классифицируется как имеющая низкий ( $X \leq 0,2$ ), средний ( $0,2 < X \leq 0,4$ ), высокий ( $0,4 < X \leq 0,6$ ), очень высокий ( $0,5 < X \leq 0,8$ ) или сверхвысокий ( $X > 0,8$ ) уровень негативного воздействия.

*Комплексная оценка экологической обстановки*

Комплексное оценивание экологической обстановки на основе показателей устойчивости  $G$  и антропогенной нагрузки  $X$  осуществляется в соответствии с правилами экологического нормирования. При этом рассматривается не ресурсно-технологическая, а экологическая ценность природных компонентов, связанная с их способностью противостоять внешним воздействиям.

Для обобщенной оценки экологической обстановки предлагается использовать показатель

$$Y = 1 - \frac{G}{X},$$

в зависимости от величины которого экосистемы ранжируются по степени неблагополучия на пять уровней:

- $Y < 0,3$  — фоновая зона толерантности экосистемы к воздействию;
- $0,3 \leq Y < 0,5$  — удовлетворительная, или зона риска, определяемая уничтожением чувствительных видов и снижением защитных функций экосистемы;
- $0,5 \leq Y < 0,6$  — напряженная, или буферная зона, в которой наблюдаются структурные изменения в экосистеме;
- $0,6 \leq Y < 0,8$  кризисная, или зона деградации, характеризующаяся подавлением защитных функций, критическими нарушениями и частичным разрушением экосистемы;
- $Y \geq 0,8$  — катастрофическая, или импактная зона с разрушением защитных функций экосистемы.

При наличии разновременных данных ДЗЗ (не менее трех сеансов съемки в различные годы) возможно уточнить полученные оценки с учетом информации о динамике изменения состояния экосистемы. В этом случае степень экологического неблагополучия определяется по результатам анализа логистической функции Ричардса, задаваемой в виде кривой «нагрузка — устойчивость» [13]:

$$G(X) = \frac{G_{\max} - G_{\min}}{1 + \exp(\alpha + \beta X + \gamma X^2)} + G_{\min},$$

где  $G_{\max}$  и  $G_{\min}$  — максимальные и минимальные (за рассматриваемый временной период) значения индекса устойчивости, установленные по данным ДЗЗ;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — коэффициенты, описывающие положение и крутизну кривой.

Значения этих коэффициентов, зависящие от физико-географических условий исследуемой территории, рассчитываются методами многомерной оптимизации.

Различные качественные состояния экосистемы, связанные с изменением масштабов антропогенной нагрузки, соотносятся при этом с положением особых точек графика  $G(X)$ , соответствующих экстремумам первой, второй и третьей производных функции Ричардса.

### Результаты оценивания экологической обстановки на территории объектов, расположенных в Арктической зоне

Рассмотренная методика оценивания экологической обстановки была опробована при обработке материалов авиационного экологического мониторинга, выполненного в 2014—2016 гг. на территории Архангельской и Мурманской областей специалистами Военно-космической академии (ВКА) им. А. Ф. Можайского. При проведении обследований задействован комплекс специального аэросъемочного оборудования, установленный на борту самолета Ан-30 и включающий в свой состав цифровые фотокамеры, гиперспектральную и инфракрасную аппаратуру наблюдения. В ходе работ оценивалось негативное влияние на окружающую среду различных действующих и заброшенных объектов, функционирование которых связано с такими опасными вредными воздействиями, как загрязнение нефтепродуктами, сильнодействующими ядовитыми веществами, крупногабаритным металлоломом [14—16].

В ходе мониторинга был выявлен ряд экологических

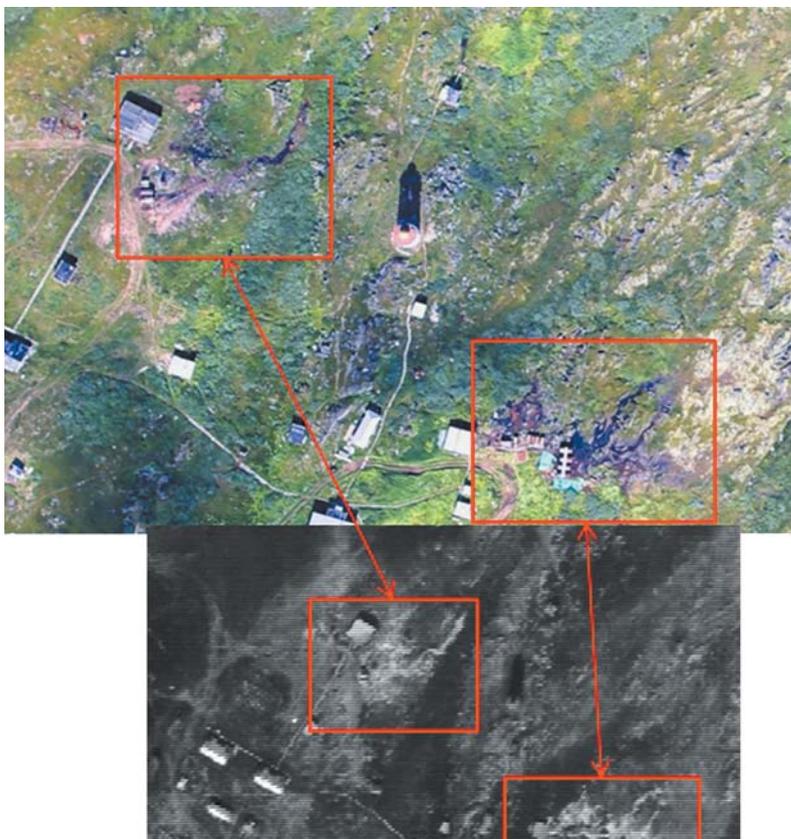


Рис. 2. Участки земель, загрязненные нефтепродуктами, на аэроснимках видимого и инфракрасного диапазонов спектра



Рис. 3. Свалка металлолома и бочкотары в прибрежной полосе

нарушений, большая часть которых относится к загрязнениям, накопленным в прошлом. Наиболее распространенными среди них являются разливы нефтепродуктов на почве (рис. 2) и в водные объекты, выведенные из эксплуатации притопленные корабли и плавсредства, огромное количество ржавеющей бочкотары, в том числе с остатками горюче-смазочных материалов (рис. 3), несанкционированные места складирования крупногабаритного металлолома и различного мусора.



Рис. 4. Разрушающиеся сооружения на территории заброшенного объекта

Территории многих заброшенных военных городков вследствие естественного разрушения объектов инфраструктуры под влиянием климатических факторов постепенно превращаются в свалки строительных отходов, относящихся к IV классу опасности (рис. 4). Всего в ходе работ были выявлены 128 притопленных судов, бочкотара на площади 34 тыс. м<sup>2</sup>, загрязнения земель нефтепродуктами (площадью более

8000 м<sup>2</sup>), свалки металлолома (более 150 тыс. м<sup>2</sup>), бытовых и строительных отходов (более 60 тыс. м<sup>2</sup>).

Для каждого обследованного объекта в специально разработанной программе составлялась карта-схема экологической обстановки (пример — на рис. 5) и производился расчет показателей устойчивости и антропогенной нагрузки. Для определения адаптационных параметров экосистемы (фитомассы и биопродуктивности растительного покрова) в дополнение к материалам гиперспектральной авиационной съемки использовались многоспектральные снимки с космического аппарата Landsat. Все результаты были занесены в созданную в ВКА им. А. Ф. Можайского базу данных экологического состояния военных объектов в АЗРФ.

Обобщенные показатели, характеризующие экологическое состояние обследованных территорий, представлены в табл. 1. Полученные данные свидетельствуют, что экологическую обстановку на большей части контролировавшихся объектов следует отнести к кризисной или катастрофической.

Проведенное ранжирование территорий по степени неблагополучия экологической обстановки позволяет установить приоритетность и срочность мероприятий по их очистке. При этом при определении очередности ликвидации накопленного экологического ущерба необходимо также учитывать расположение объектов относительно населенных пунктов и особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Дополнительными факторами, влияющими на планирование восстановительных работ, являются их трудоемкость и стоимость, которые в АЗРФ во многом зависят от имеющихся возможностей утилизации и вывоза мусора на санкционированные, зачастую весьма удаленные (рис. 6) от мест очистки полигоны. При отсутствии прямого автомобильного

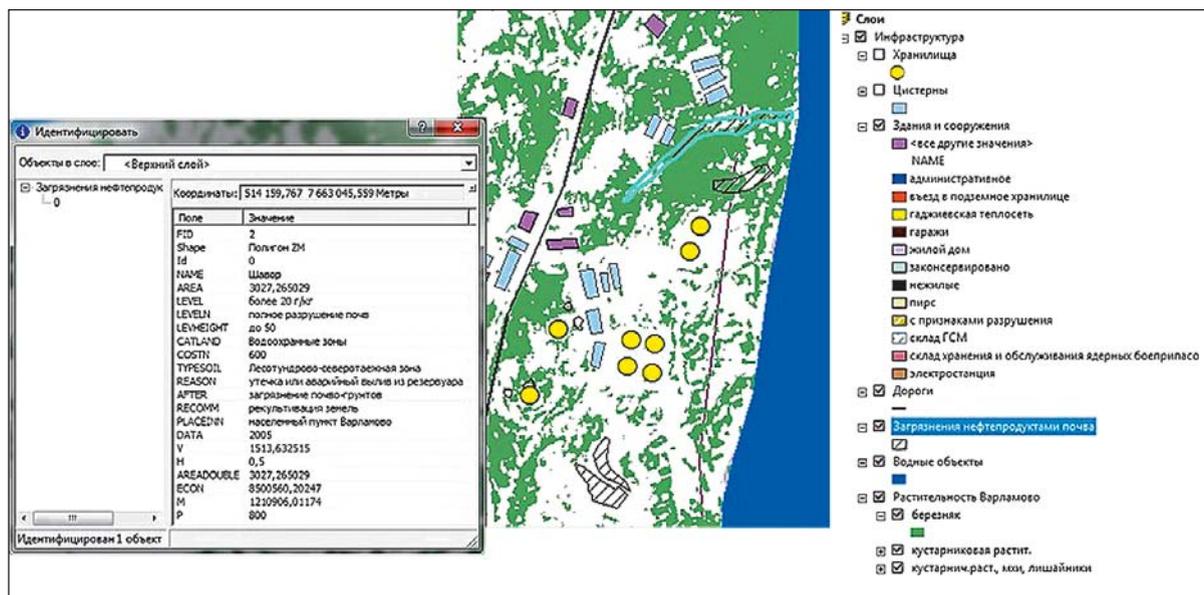


Рис. 5. Отображение участков загрязнения земель нефтепродуктами на карте-схеме экологической обстановки

Таблица 1. Обобщенные показатели экологической обстановки на территории обследованных объектов

№ п/п	Район расположения объекта	Устойчивость $G$	Антропогенная нагрузка $X$	Экологическая обстановка $Y$
1	Островной	0,06	0,26	0,77 (кризисная)
2	Харловка	0,06	0,47	0,88 (катастрофическая)
3	Мыс Немецкий	0,11	0,70	0,85 (катастрофическая)
4	Варламово	0,24	0,60	0,60 (кризисная)
5	Североморск-3	0,24	0,26	0,08 (фоновая)
6	Печенга	0,12	0,25	0,52 (напряженная)
7	Пушной	0,30	0,21	-0,43 (фоновая)
8	Устье реки Поной	0,10	0,46	0,78 (кризисная)
9	Мыс Орлово-Терский	0,06	0,28	0,78 (кризисная)
10	Мыс Корабельный	0,06	0,47	0,87 (катастрофическая)
11	Устье реки Варзуга	0,15	0,20	0,25 (фоновая)
12	Североморск	0,25	0,70	0,64 (кризисная)
13	Остров Моржовец	0,06	0,62	0,90 (катастрофическая)

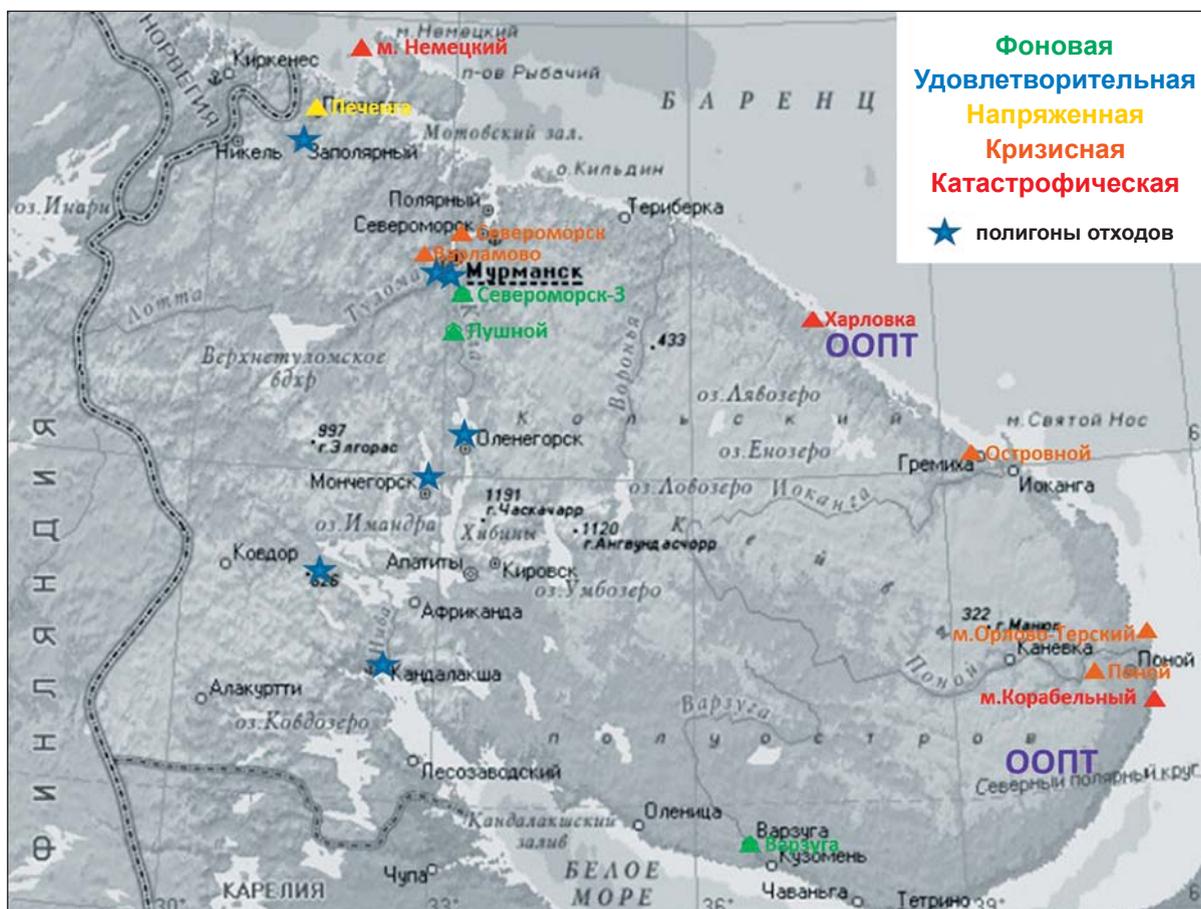


Рис. 6. Ранжирование обследованных объектов в Мурманской области для планирования мероприятий по ликвидации накопленного экологического ущерба

сообщения транспортировка неопасных отходов по морю является нерентабельной и по сути лишённой практического смысла.

В процессе принятия решений о порядке ликвидации разрушающихся зданий и сооружений должны учитываться также возможные существенные повреждения почвогрунтов вследствие механических нагрузок, ущерб от которых может превысить вред от самих устраняемых источников негативного воздействия [17]. Важную помощь при выборе оптимальных методов и технологий очистки и рекультивации территорий с накопленным экологическим ущербом может оказать имеющийся опыт аналогичных работ, выполненных на островах архипелага Земля Франца-Иосифа, острове Северный архипелага Новая Земля и острове Белый [16; 18].

Результаты проведенных обследований позволяют считать наиболее неблагоприятной экологическую обстановку на острове Моржовец, на территории которого наблюдаются свалки бочкотары на площади более 27 тыс. м<sup>2</sup>. Деградация земель происходит не только путем загрязнения химическими поллютантами, но и вследствие эрозии, заболачивания и физического разрушения за счет перекрытия верхнего горизонта. Эти негативные изменения приводят к увеличению глубины протаивания почвы в 1,5—2 раза, что является причиной выявленных фактов образования промоин и сползания грунта с линз вечной мерзлоты.

Серьезные негативные последствия от выявленных загрязнений прогнозируются также на объектах, расположенных в северной и северо-восточной частях Кольского полуострова (Островной, Харловка, мыс Немецкий, река Поной, мысы Орлово-Терский и Корабельный). Эти территории относятся к подзонам тундры с пониженным температурным режимом, коротким летом, кислыми почвами с низким содержанием гумуса, что обуславливает вероятность необратимой деградации земель и растительного покрова. Имеющиеся на ряде объектов участки, подозреваемые на нефтяную контаминацию грунта с сильным (0,5—1 кг/м<sup>3</sup>) и очень сильным (более 1 кг/м<sup>3</sup>) повреждением, могут быть полностью очищены не ранее чем через 15 лет и только в случае интенсификации процессов естественного восстановления.

Особое внимание должно быть уделено очистке территорий (мыс Орлово-Терский, мыс Корабельный, река Поной), находящихся в пределах Государственного природного биологического заказника регионального значения «Понойский». Состояние экосистемы на этих объектах квалифицируется как кризисное и катастрофическое из-за наличия большого количества ржавеющей бочкотары и участков, подозреваемых на нефтезагрязнение земель, в том числе находящихся на водосборной площади реки, имеющей ценное рыбохозяйственное значение.

Следующую группу по степени неблагоприятности экологической обстановки образуют объекты

(Североморск, Варламово), расположенные на побережье Кольского залива, в акватории которого зарегистрированы многочисленные нефтяные пленки. Ситуация усугубляется тем, что загрязнения имеют долговременный характер и могут быть вызваны разными возможными источниками (действующие суда, брошенные корабли и плавсредства, загрязненные поверхностные стоки, подземные линзы нефтепродуктов в береговой черте). При этом отдельные бухты из-за закрытого типа и малых глубин имеют низкий потенциал самоочищения.

На объектах с фоновой экологической обстановкой негативные воздействия на окружающую среду связаны с захлаплением территорий незначительными свалками бытовых и строительных отходов IV и V классов опасности, ликвидация которых не требует принятия мер немедленного реагирования и должна осуществляться в плановом порядке.

### Заключение

При освоении территорий АЗРФ на современном этапе необходимо учитывать имеющийся отрицательный опыт размещения антропогенных объектов в данном регионе, характеризующемся особой уязвимостью экосистемы. С этой целью должны приниматься превентивные меры по обеспечению экологической безопасности, включая организацию эффективной системы мониторинга состояния окружающей среды с использованием авиационных и космических средств ДЗЗ.

Материалы аэрокосмической съемки обеспечивают получение достоверной информации об экологической обстановке, а при необходимости контроля удаленных и значительных по площади территорий позволяют существенно уменьшить трудовые затраты на проведение обследований.

Рассмотренные в статье методические подходы к комплексному оцениванию по данным ДЗЗ экологического состояния территорий позволяют не только установить масштаб вредного воздействия на компоненты природной среды, но и спрогнозировать развитие наблюдаемых негативных изменений в зависимости от устойчивости экосистемы к антропогенной нагрузке. Предложенная система обобщенных показателей, характеризующих экологическую обстановку, может быть использована в качестве исходных данных для определения срочности и приоритетности работ по ликвидации выявленных нарушений и для планирования мероприятий в рамках федерального и производственного экологического контроля.

### Литература

1. Григорьева О. В., Саидов А. Г., Панин А. В. Индикатор состояния почво-грунтов в районах обращения нефти и нефтепродуктов, полученный неконтактными средствами наблюдений // Экология и пром-сть России. — 2010. — № 10. — С. 2—5.

2. Григорьева О. В., Чапурский Л. И. Проблемы создания и информационного наполнения базы данных по коэффициентам спектральной яркости объектов наземных экосистем // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса*. — 2012. — Т. 9, № 3. — С. 18—25.
3. Марков А. В., Григорьева О. В., Бровкина О. В. и др. Автоматизированные методы оценки состояния окружающей среды по данным мульти- и гиперспектральной космической съемки // *Геоматика*. — 2012. — № 4. — С. 102—106.
4. Марков А. В., Григорьева О. В., Жуков Д. В. Разработка алгоритмов эффективной тематической обработки данных гиперспектральных систем для идентификации объектов ландшафта // *Науч.-техн. журн. «Контентант»*. — 2013. — № 2 (12). — С. 90—99.
5. Brovkina O., Hanuš J., Zemek F. et al. Evaluation the potential of satellite hyperspectral Resours-P2 data forest application / *Intern. society for photogrammetry and remote sensing // ISPRS Congress*. — Prague, 2016.
6. Крапивин В. Ф., Кондратьев К. Я. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. — СПб., 2002. — 724 с.
7. Xiao X., Hollinger D., Aber J. et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest // *Remote sensing of environment*. — 2004. — 89 (4). — P. 519—534.
8. Sellers P. J., Los S. O., Tucker C. J. et al. A global 1 by 1 degree NDVI data set for climate studies. — Pt. 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data // *Intern. J. of Remote Sensing*. — 1994. — Vol. 15, № 17. — P. 3519—3545.
9. Хаустов А. П. Природопользование, охрана окружающей среды и экономика: Теория и практикум: Учебное пособие / Под ред. А. П. Хаустова. — М.: Изд-во РУДН, 2006. — 613 с.
10. Саидов А. Г., Григорьева О. В., Панин А. В. Интегральная оценка негативных воздействий техногенных объектов на окружающую среду с использованием материалов аэрокосмосъемки // *Тр. СПИИ-РАН*. — 2013. — Вып. 8 (31). — С. 177—189.
11. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. — М.: Мир, 1993. — 368 с.
12. Ким Дж. О., Мьюллер Ч. У., Кленка У. Р. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 215 с.
13. Виноградов Б. В. Экологическая интерпретация аэрокосмических измерений геофизических эффектов антропогенных воздействий: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — М., 1983. — 411 с.
14. Айбулатов Н. А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии / Отв. ред. В. И. Осипов. — М.: Наука, 2005. — 364 с.
15. Сафонова О. А. Проблемы ликвидации накопленного экологического ущерба в Чукотском автономном округе // *Арктика: экология и экономика*. — 2014. — № 1 (13). — С. 74—79.
16. Соколов Ю. И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // *Арктика: экология и экономика*. — 2013. — № 2 (10). — С. 18—27.
17. Летучий Ю. А. Оценивание экологического ущерба от деятельности вооруженных сил в Арктическом регионе // *Тр. Воен.-космич. акад. им. А. Ф. Можайского*. — 2015. — С. 175—180.
18. Программа очистки архипелага Земля Франца-Иосифа. — URL: [http://www.polarf.ru/franz\\_josef/](http://www.polarf.ru/franz_josef/).

### Информация об авторах

**Григорьева Ольга Викторовна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Военный институт (научно-исследовательский), Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), e-mail: alenka12003@mail.ru.

**Марков Андрей Викторович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Военный институт (научно-исследовательский), Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), e-mail: markov\_av69@mail.ru.

**Иванец Максим Олегович**, кандидат технических наук, начальник отдела, Военный институт (научно-исследовательский), Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), e-mail: max\_ivanec@mail.ru.

**Терентьева Виктория Вячеславовна**, научный сотрудник, Военный институт (научно-исследовательский), Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), e-mail: vikulya-terentyeva@mail.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Григорьева О. В., Марков А. В., Иванец М. О., Терентьева В. В. Методика комплексной оценки экологической обстановки на объектах в Арктической зоне по данным аэрокосмической съемки // *Арктика: экология и экономика*. — 2018. — № 1 (29). — С. 37—47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-37-47.

## THE INTEGRATED ESTIMATION METHODOLOGY OF THE ENVIRONMENTAL IN THE ARCTIC USING AEROSPACE IMAGE SITUATION

Grigorieva O. V., Markov A. V., Ivanets M. O., Terentyeva V. V.

A. F. Mozhaisky Military Space Academy (St. Petersburg, Russian Federation)

### Abstract

The article shows the original methodology of assessment of ecological situation that allows ranking areas according to the degree of environmental problems. The proposed approach involves a complex assessment of the ecosystem state based on the present anthropogenic impact and development prediction of the detected negative changes in nature. The distinctive feature of the methodology is the possibility to prepare the necessary initial data as a result of aerospace data processing that is the main source of up-to-date information about large and hard-to-reach Arctic territories.

For the complex assessment of ecosystem state we propose to use complex parameters of ecosystem stability and anthropogenic load. The complex parameter of ecosystem stability defines its adaptive capacity and depends on phytomass amount and bioproductivity of vegetation cover which prevails in a surveyed area. These parameters define productive properties of vegetation and are calculated as a result of the processing of multispectral data in the visible and near infrared range of the spectrum. The parameters of anthropogenic load are calculated separately for each natural component (water, soil and vegetation) and pollutions which were identified on the image. The partial estimates show the influence level of each detected negative fact in accordance with its danger and area distribution. The complex index of anthropogenic load on ecosystem is wholly estimated by taking into account all the component indicators. The ratio between the complex parameters of ecosystem stability and anthropogenic load is adopted as a criterion for establishing the level of ecological problem.

Consequently the indicators, determined by the methodology, allow us not only to scale a harmful effect but also to predict negative changes in the environment identified with the help of the remote sensing data. The proposed principle of object ranking, which is based on the environmental situation, can be used for decision-making about urgency and priority of elimination of the detected violation.

In the article we give some examples of the practical implementation of the methodology for processing of air environmental monitoring of objects located in the Arctic zone of Russia. In accordance with the proposed system of parameters the environmental situation of the most studied territories can be characterized as crisis or catastrophic.

**Keywords:** *aerospace data, ecosystem stability, anthropogenic load, assessment of ecosystem state.*

### References

1. Grigor'eva O. V., Saidov A. G., Panin A. V. Indikator sostoyaniya pochvo-gruntov v raionakh obrashcheniya nefi i nefteproduktov, poluchennyi nekontaktnymi sredstvami nablyudeni. [The indicator of soil condition in areas of oil and oil products circulation obtained by non-contact means of monitoring]. *Ekologiya i prom-st' Rossii*, 2010, no. 10, pp. 2—5. (In Russian).
2. Grigor'eva O. V., Chapurskii L. I. Problemy sozdaniya i informatsionnogo napolneniya bazy dannykh po koefitsientam spektral'noi yarkosti ob'ektov nazemnykh ekosistem. [The problems of creation and content of the database from the coefficients of the spectral brightness of the objects of terrestrial ecosystems]. *Sovrem. problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 18—25. (In Russian).
3. Markov A. V., Grigor'eva O. V., Brovkina O. V., Mochalov V. F., Zhukov D. V. Avtomatizirovannye metody otsenki sostoyaniya okruzhayushchei sredy po dannym mul'ti i giperspektral'noi kosmicheskoi s'emki. [Automated methods for environmental assessment based on multi- and hyperspectral imagery]. *Geomatika*, 2012, no. 4, pp. 102—106. (In Russian).
4. Markov A. V., Grigor'eva O. V., Zhukov D. V. Razrabotka algoritmov effektivnoi tematicheskoi obrabotki dannykh giperspektral'nykh sistem dlya identifikatsii ob'ektov landshafta. [The development of efficient algorithms for thematic processing of hyperspectral systems for the identification of landscape objects]. *Nauch.-tekhn. zhurn. "Kontenant"*, 2013, no. 2 (12), pp. 90—99. (In Russian).
5. Brovkina O., Hanuš J., Zemek F., Mochalov V., Grigorieva O., Píkl M. Evaluation the potential of satellite hyperspectral Resours-P2 data forest application. Intern. society for photogrammetry and remote sensing. IS-PRS Congress. Prague, 2016.
6. Krapivin V. F., Kondrat'ev K. Ya. Global'nye izmeneniya okruzhayushchei sredy: ekoinformatika. [Environmental global change: ecoinformatics]. St. Petersburg, 2002, 724 p. (In Russian).

7. Xiao X., Hollinger D., Aber J., Goltz M., Davidson E. A., Zhang Q., Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote sensing of environment*, 2004, 89 (4), pp. 519—534.
8. Sellers P. J., Los S. O., Tucker C. J., Justice C. O., Dazlich D. A., Collatz G. J., Randall D. A. A global 1 by 1 degree NDVI data set for climate studies. Pt. 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Intern. J. of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, no. 17, pp. 3519—3545.
9. Khaustov A. P. *Prirodopol'zovanie, okhrana okruzhayushchei sredy i ekonomika: Teoriya i praktikum: Uchebnoe posobie*. [Environmental management, environmental protection and economy: theory and practice]. Pod red. A. P. Khaustova. Moscow, Izd-vo RUDN, 2006, 613 p. (In Russian).
10. Saidov A. G., Grigor'eva O. V., Panin A. V. Integral'naya otsenka negativnykh vozdeystvii tekhnogennykh ob'ektov na okruzhayushchuyu sredu s ispol'zovaniem materialov aerokosmos'emki. [Integral estimation of negative impacts of technogenic objects in the environment using airborne data]. *Tr. SPIIRAN*, 2013, vyp. 8 (31), pp. 177—189. (In Russian).
11. Asai K., Vatada D., Ivai S. *Prikladnye nechetkie sistemy*. [Applied fuzzy systems]. Per. s yapon. Pod red. T. Terano, K. Asai, M. Sugeno. Moscow, Mir, 1993, 368 p. (In Russian).
12. Kim Dzh. O., M'yuller Ch. U., Klekka U. R. *Faktornyi, diskriminantnyi i klasternyi analiz: Per. s angl.* [Factor, discriminant and cluster analysis]. Moscow, Finansy i statistika, 1989, 215 p. (In Russian).
13. Vinogradov B. V. *Ekologicheskaya interpretatsiya aerokosmicheskikh izmerenii geofizicheskikh effektov antropogennykh vozdeystvii: Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. [Ecological interpretation of aerospace measurements of geophysical effects of anthropogenic impacts]. Moscow, 1983, 411 p. (In Russian).
14. Aibulatov N. A. *Deyatel'nost' Rossii v pribrezhnoi zone morya i problemy ekologii*. [Activity of Russia in the coastal area and ecological problems]. Otv. red. V. I. Osipov. Moscow, Nauka, 2005, 364 p. (In Russian).
15. Safonova O. A. *Problemy likvidatsii nakoplennoego ekologicheskogo ushcherba v Chukotskom avtonomnom okruge*. [The problems of elimination of accumulated environmental damage in The Chukotka Autonomous district]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2014, no. 1 (13), pp. 74—79. (In Russian).
16. Sokolov Yu. I. *Arktika: k probleme nakoplennoego ekologicheskogo ushcherba*. [Arctic. The problem of accumulated environmental damage]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2013, no. 2 (10), pp. 18—27. (In Russian).
17. Letuchii Yu. A. *Otsenivanie ekologicheskogo ushcherba ot deyatelnosti vooruzhennykh sil v Arkticheskoy regione*. [Assessment environmental damage from the activities of the armed forces in the Arctic]. *Tr. Voen.-kosmich. akad. im. A. F. Mozhaiskogo*, 2015, pp. 175—180. (In Russian).
18. *Programma ochistki arhipelaga Zemlya Frantsia-losifa*. [Cleanup of the archipelago Franz-Joseph]. Available at: [http://www.polarf.ru/franz\\_josef/](http://www.polarf.ru/franz_josef/). (In Russian).

### Information about the authors

**Grigorieva Olga Viktorovna**, Ph.D. (Technics), Senior Researcher of Military institute (scientific-research), A. F. Mozhaisky Military Space Academy (13, Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia, 197198), e-mail: alenka12003@mail.ru.

**Markov Andrey Victorovich**, Ph.D. (Technics), Senior Researcher of Military institute (scientific-research), A. F. Mozhaisky Military Space Academy (13, Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia, 197198), e-mail: markov\_av69@mail.ru.

**Ivanets Maxim Olegovich**, Ph.D. (Technics), Head of department of Military institute (scientific-research), A. F. Mozhaisky Military Space Academy (13, Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia, 197198), e-mail: max\_ivanec@mail.ru.

**Terentyeva Victoria Vyacheslavovna**, Researcher of Military institute (scientific-research), A. F. Mozhaisky Military Space Academy (13, Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia, 197198), e-mail: vikulya-terentyeva@mail.ru.

### Bibliographic description

**Grigorieva O. V., Markov A. V., Ivanets M. O., Terentyeva V. V.** The integrated estimation methodology of the environmental in the Arctic using aerospace image situation. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 1 (29), pp. 37—47. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-37-47. (In Russian).