

## Дистанционные методы при решении задач экологической безопасности

А.А. Тронин

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18  
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru*

Рассмотрены вопросы применения дистанционных методов при решении задач экологической безопасности, связанных с оценкой уровня безопасности экосистем. Проанализированы основные достижения в области дистанционных методов, используемые для оценок биоразнообразия, потоков вещества и энергии, продуктивности экосистем. Определены возможности дистанционных методов для изучения новых угроз экологической безопасности. Намечены направления развития дистанционных методов для оценки экологической безопасности территорий.

**Ключевые слова:** дистанционные методы, экологическая безопасность, экосистема, биоразнообразие, продуктивность.

### Введение

Основные задачи экологической безопасности, или безопасности экосистем могут быть сформулированы следующим образом: 1) оценка и прогноз состояния экосистем; 2) определение современной антропогенной нагрузки на экосистемы; 3) оценка реакции экосистем на антропогенное воздействие; 4) оценка уровня безопасности экосистем; 5) выявление новых угроз экологической безопасности.

Ключевым элементом при решении задач экологической безопасности является оценка уровня безопасности экосистем. Такую оценку можно проводить с двух сторон: по уровню антропогенного воздействия и по реакции экосистем на это воздействие. К первому направлению относится оценка потоков вещества и энергии в экосистеме, ко второму – определение состояния продуцентов и биоразнообразия экосистем.

Разработка методов оценки экологической безопасности в значительной степени зависит от типа экосистемы, поэтому необходимо изучение распределения экосистем на исследуемой территории. Анализ распределения площадей основных наземных экосистем России был выполнен на основе карты экосистем Северной Евразии (Барталев и др., 2004). Распределение площадей основных наземных экосистем России показано на *рис. 1*. Как видно из рисунка, около 80% экосистем относятся к бореальным: леса, тундра, болота. Оставшиеся 20% относятся к горным массивам, лиственным растительности, сельскохозяйственным землям, внутренним водоемам, степям и селитебным территориям.

Целью работы является определение возможностей современных методов дистанционного зондирования для решения задач экологической безопасности на территории Российской Федерации.

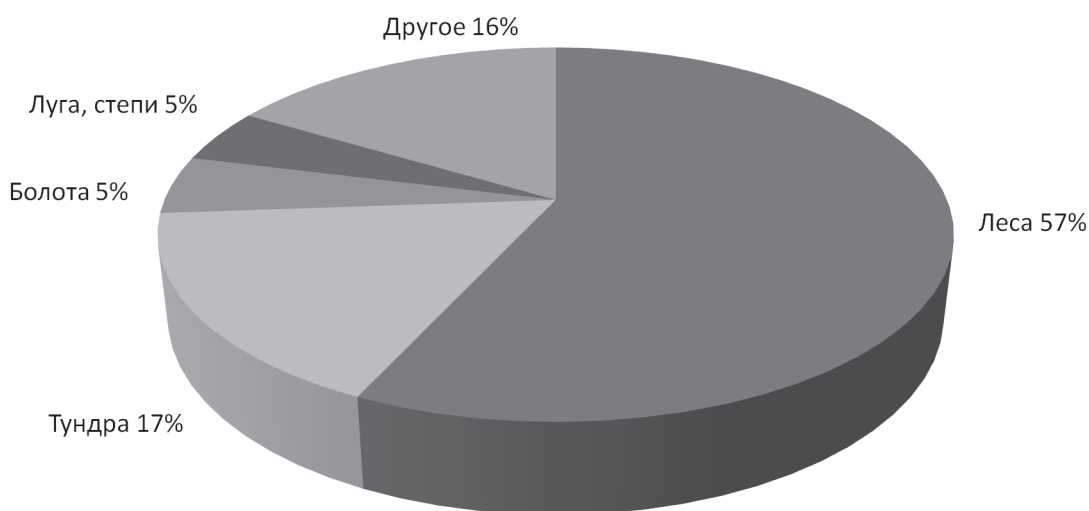


Рис. 1. Распределение площадей основных наземных экосистем России

### Биоразнообразие

Экологическая безопасность территорий может быть определена по биоразнообразию. Дистанционные методы применяются для определения биоразнообразия по видовому составу растительного покрова и по разнообразию экосистем. В настоящее время уровень развития дистанционных методов позволяет определять виды экосистем, например отличить хвойные вечнозеленые леса от хвойных листопадных. На этой основе можно вычислять индексы разнообразия территорий. В качестве примера был рассчитан индекс Шеннона (табл. 1) для Северо-Запада России по данным картирования наземных экосистем Северной Евразии (Баргалева и др., 2004).

Таблица 1. Биоразнообразие экосистем Северо-Запада России

<i>Субъект Федерации</i>	<i>Индекс Шеннона, бит</i>
Архангельская область	2,57
Вологодская область	2,79
Калининградская область	2,20
Республика Карелия	2,32
Республика Коми	2,33
Ленинградская область	2,96
Мурманская область	2,76
Ненецкий автономный округ	3,14
Новгородская область	3,03
Псковская область	3,04

Анализ полученных данных показывает, что индекс разнообразия экосистем в значительной мере зависит от процедуры классификации, выделения экосистем в отдельные классы. При этом классы, полученные при классификации, являются композитными, например класс «хвойные вечнозеленые леса» можно делить на еловые, сосновые, пихтовые и т.д. леса.

Как и при построении карт экосистем, построение карт отдельных видов растений требует процедуры классификации. Но результатом классификации являются классы видов, например класс «сосна» или «ель», которые обладают целостностью. В этом смысле определение видового разнообразия несет ясный биологический смысл и выглядит предпочтительней. Работы по применению данных дистанционного зондирования для определения видового разнообразия растительного покрова в зонах высокой антропогенной нагрузки проводятся в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (Черненькая, 2009).

### Потоки вещества и энергии

Оценка воздействия токсичных загрязняющих веществ на экосистему сложна по объективным причинам: антропоцентризм (большинство нормативов разработано для человека), бесконечное число веществ, кумулятивный эффект, затруднен учет формы вещества, не всегда учитывается устойчивость соединения, неясен переход от токсичности к рискам, высокая стоимость исследований. В качестве примера можно привести несколько нормативных актов в области окружающей среды России (табл. 2), показывающее большое число контролируемых веществ.

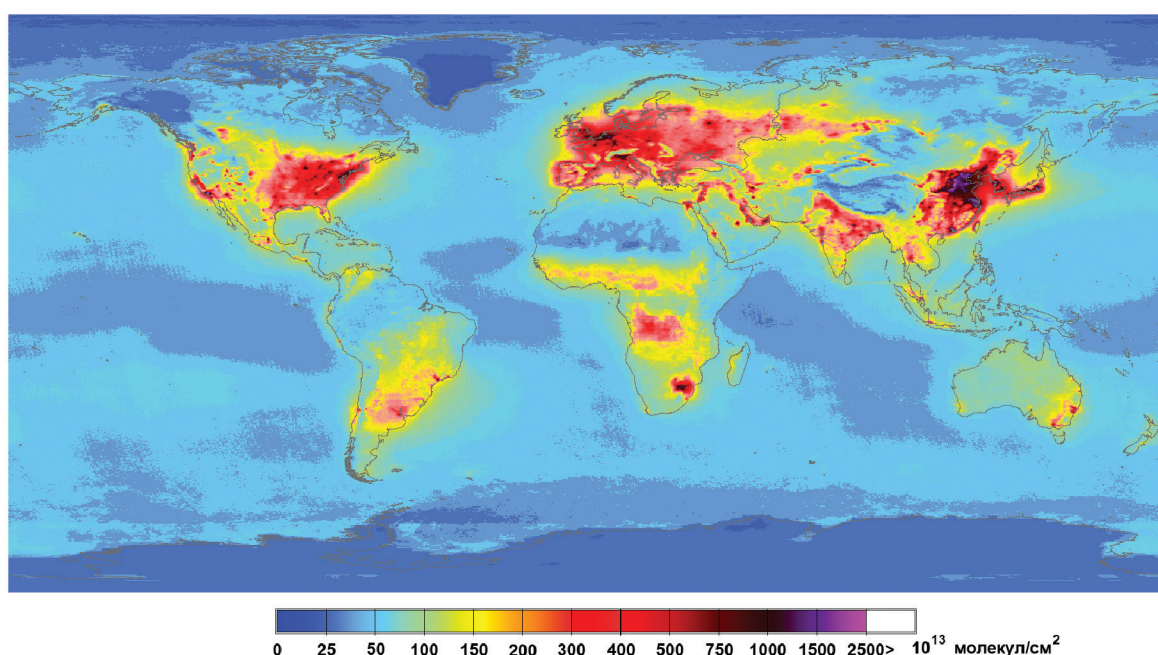
Таблица 2. Некоторые нормативы содержания экотоксикантов в природных средах

<i>Норматив</i>	<i>Число веществ</i>	<i>Дата ввода</i>
Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения	1071	16 марта 2010 г.
Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды	414	25 июня 2003 г.
ПДК* химических веществ в почве	39	1 апреля 2006 г.
ПДК* загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест	656	25 июня 2003 г.

\* ПДК – предельно допустимая концентрация.

В настоящее время дистанционные методы не способны определять концентрации сколько-нибудь сравнимого числа веществ с нормативными документами. В данной ситуации выход видится в использовании веществ-индикаторов антропогенного загрязнения экосистем. Такими индикаторами, хотя далеко не всегда, для водных экосистем являются мутность воды и концентрация хлорофилла А. Примером применения дистанционных методов для определения нагрузки на водные экосистемы могут быть исследования мутности воды при строительстве Северо-Европейского газопровода в Балтийском море (Гришин,

Костяной, 2012) или намыв территорий Санкт-Петербурга (Тронин, 1995). Оценка экотоксикантов в наземных экосистемах представляет собой еще более сложную задачу. Единственным кандидатом на решение этой задачи в бореальных экосистемах можно считать метод спутникового анализа выпадения пыли и сажи на снежном покрове. Такие работы были успешно проведены для ряда городов и промышленных комплексов Сибири и Урала (Дмитриев, Дмитриев, 2008). Потоки загрязняющих веществ в атмосфере являются целью спутниковых исследований газовых компонентов атмосферы и аэрозоля. Существующие технические средства позволяют выполнять наблюдения за концентрацией некоторых экотоксикантов в столбе атмосферы, таких как: оксид углерода, диоксид серы, диоксид азота, аэрозоль и др. На *рис. 2* показано распределение диоксида азота – газа индикатора антропогенной нагрузки в атмосфере Земли (Тронин и др., 2009).



*Рис. 2. Среднее содержание диоксида азота в столбе атмосферы в 2005–2009 гг. (прибор OMI на борту спутника AURA)*

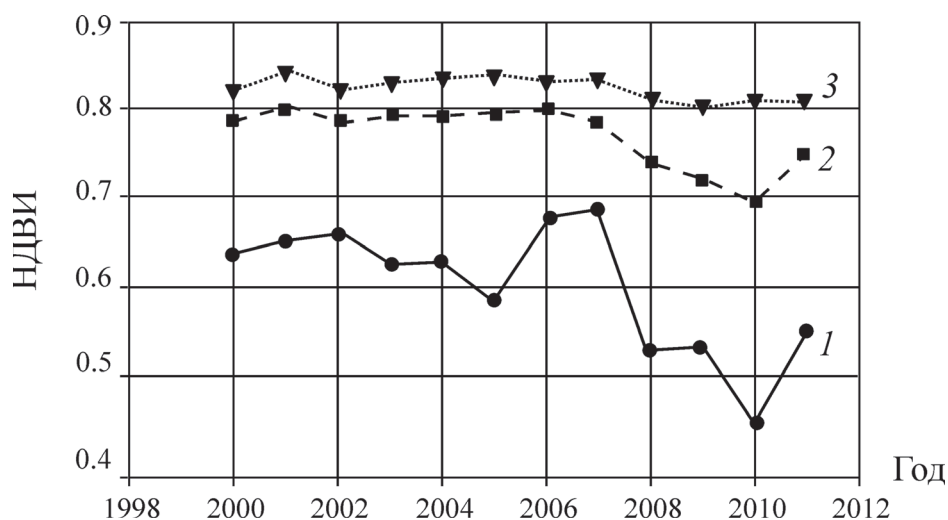
Первые опыты по применению термодинамического подхода к анализу состояния экосистем по данным спутниковых наблюдений выполнены на примере нескольких промышленных предприятий горно-металлургического комплекса, объектах транспортной инфраструктуры, местах радиационных аварий (Горный и др., 2011). Суть метода заключается в построении термодинамического индекса антропогенного воздействия, основанного на испаряемости растительности. При этом полученный индекс оказывается более чувствительным к антропогенному воздействию, чем вегетационный индекс.

Энергетический подход к решению проблем экологической безопасности дистанционными методами еще не применялся. Тем не менее, это направление представляется одним из наиболее перспективных, так как давно ведутся работы по изучению зависимости энергопотребления региона от его ночной светимости, определяемой по данным дистанционного зондирования (Годунов, Жижин, 2011). Представляется, что сравнение потребленной

«антропогенной» энергии с энергией, поглощенной растениями позволит оценить уровень экологической безопасности регионов. Энергия, поглощенная растениями, измеряется по данным дистанционного зондирования и находит отражение в вегетационном индексе и продукции экосистем.

### Состояние продуцентов

Дистанционные методы давно и успешно используются для определения состояния продуцентов (Виноградов и др., 1994). Наиболее долгий опыт накоплен в области использования вегетационных индексов для анализа антропогенной нагрузки на территории. Обследовано множество промышленных объектов (Калабин и др., 2010), городских агломераций, выявлена пространственно-временная динамика растительного покрова в зависимости от уровня антропогенной нагрузки. На *рис. 3* показано изменение во времени вегетационного индекса Олимпиадинского золоторудного месторождения (Калабин и др., 2013). В настоящее время состояние продуцентов можно не только оценивать с помощью различных индексов, но и перейти к количественным оценкам продуктивности экосистем. Первые исследования в этой области также продемонстрировали эффективность применения этого подхода к задачам экологической безопасности (Елсаков, 2012).



*Рис. 3. Изменения многолетних значений НДВИ в июле, рассчитанные в пределах кольцевых зон вокруг Олимпиадинского золоторудного месторождения диаметрами: 0–5 км (1); 5–8 км (2); 15–30 км (3); (Калабин, 2013)*

### Новые угрозы экологической безопасности

Роль дистанционных методов в изучении новых угроз экологической безопасности может быть весьма существенной. В первую очередь это касается проблемы регистрации изменений характеристик экосистем, связанных с изменением климата. Климатические изменения приводят к изменениям биоопасностей, смене экосистем, иногда резкой через пожары, окисление водоемов. Дистанционные методы уже находят свое применение

в контроле биоопасностей (Тронин, 2005). Выполняются работы по применению спутниковых методов для картирования лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом (Девятова и др., 2006), жуком типографом (Маслов, 2010). Разрабатываются технологии спутникового мониторинга численности вредителей сельского хозяйства, например, саранчовых (Горный и др., 2008). Применяются дистанционные методы и для изучения ареалов переносчиков трансмиссивных заболеваний человека, таких, как иксодовые клещи (Тронин и др., 2008). Мониторинг лесных пожаров и динамики зарастания гарей является уже частью производственной системы (Ершов и др., 2004).

Особый интерес представляют возможности дистанционных методов для обнаружения новых и ранее неизвестных экотоксикантов. Одной из наиболее актуальных задач экологической безопасности является обнаружение массового размножения сине-зеленых водорослей в водоемах. Водоросли генерируют опасные нейротоксины и гепатотоксины, что представляет угрозу водоснабжению и рекреационным зонам. Другая проблема связана с определением концентраций аэрозоля с частицами менее 2,5 мкм. Эти частицы наиболее опасны при вдыхании. В настоящее время спутниковые методы позволяют определять концентрации аэрозоля как над водной поверхностью, так и над сушей.

### Заключение

Попытки оценить экологическую безопасность территорий предпринимались и раньше. Предлагалось использовать в качестве оценки уровня безопасности долю пахотных земель, или долю лесов в общей площади региона. Но эти оценки сильно зависят от типа экосистемы. Возможный вариант – определение уровня экологической безопасности территорий по доле антропогенных поверхностей: городов, предприятий, дорог. Здесь значительные сложности встретятся в разделении природных и искусственных поверхностей без растительности. Перспективным направлением можно считать определение доли территории занятой отходами. Проблема классификации отходов по данным дистанционного зондирования также пока остается не решенной.

На данный момент наиболее целесообразным представляется применение дистанционных методов для оценки уровня экологической безопасности в направлении определения потоков энергии в экосистеме и состояния продуцентов.

### Литература

1. *Барталев С.А., Белвард А.С., Ершов Д.В., Исаев А.С.* Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation. Проект Global Land Cover 2000. Информационная система TerraNorte. М.: ИКИ РАН, 2004.
2. *Виноградов В.Г., Мартынов А.С., Тишков А.А.* Первичная продуктивность растительного покрова // Состояние биологических ресурсов и биоразнообразия России и ближнего зарубежья (1988–1993 гг.): Приложение к Государственному докладу о состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1993 г. М., 1994. С. 9–10.

3. Годунов А.И., Жижин М.Н. Метод оценки объемов сжигания попутного газа по спутниковым изображениям ночных огней // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 83–89.
4. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Теплякова Т.Е., Тронин А.А. Измерительная технология спутникового мониторинга саранчовых // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 469–476.
5. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования уровня антропогенной нагрузки на экосистемы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
6. Гришин Н.Н., Костяной А.Г. О спутниковом мониторинге распространения взвешенных наносов при строительстве морского газопровода Nord Stream в российских водах Балтийского моря в 2010 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 8. № 1. С. 167–175.
7. Девятова Н.В., Ершов Д.В., Лямцев Н.И., Денисов Б.С. Оценка повреждений лесов сибирским шелкопрядом в Центральной Якутии по данным спектрорадиометра MODIS-TERRA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 306–314.
8. Дмитриев А. В., Дмитриев В.В. Корреляция динамики снеготаяния и содержания пылевых веществ в снегу вокруг г. Омска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 84–91.
9. Елсаков В.В. Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 71–79.
10. Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Тащилин С.А. Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т.1. № 1. С. 47–57.
11. Калабин Г.В., Евдокимова Г.А., Горный В.И. Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в процессе снижения воздействия комбината «Североникель» на окружающую среду // Горный журнал. 2010. № 2. С. 74–77.
12. Калабин Г.В., Моисеенко Т.И., Горный В.И., Крицук С.Г., Соромотин А.В. Спутниковый мониторинг природной среды при открытой разработке Олимпиадинского золоторудного месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. (в печати).
13. Маслов А.Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов. М.: ВНИИЛМ, 2010. 138 с.
14. Тронин А. А. Применение результатов съемки спутника JERS-1 для измерения мутности воды // Исследования Земли из космоса. 1995. № 1. С. 49–56.
15. Тронин А.А. Космические методы при контроле биоопасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 318–320.
16. Тронин А.А., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Диоксид азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2. № 6. С. 217–223.

17. Тронин А.А., Токаревич Н.К., Антыкова Л.П., Теплякова Т.Е., Крижук С.Г. Дистанционные методы при исследованиях иксодовых клещей – переносчиков природноочаговых инфекций // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 376–381.
18. Черненькая Т. В. Оценка биоразнообразия лесов наземными и дистанционными методами на основе ГИС-технологий // Биосфера. 2009. Т. 1. № 1. С. 93–100.

## **Remote sensing in ecological safety**

**A.A. Tronin**

*Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS  
197110, Saint-Petersburg, 18 Korpusnaya Str.  
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.edu*

The paper described main directions in remote sensing applications for ecological safety. Ecosystem safety level definition is considered as one of the main target. Remote sensing ability for the evaluation of biodiversity, matter and energy fluxes, ecosystem primary production. Investigation of new ecological safety imminences with remote sensing is described. Future development of remote sensing in ecosystem safety level definition is indicated.

**Keywords:** remote sensing, ecological safety, ecosystem, biodiversity, primary production.