

## Сравнительный анализ результатов дистанционного определения вегетационных индексов и данных биоиндикационных исследований в задачах экологического мониторинга

О.С. Токарева<sup>1</sup>, Ю.М. Полищук<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: ostokareva@gmail.com

<sup>2</sup> Югорский НИИ информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>3</sup> Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия

E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Рассмотрены вопросы использования вегетационных индексов, определяемых на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса, для оценки техногенного воздействия химического загрязнения атмосферы на состояние хвойных деревьев как биоиндикаторов таежной зоны. Исследования выполнены в зоне влияния факельных установок для сжигания попутного газа, расположенных на территории Приобского нефтяного месторождения. Проведен сравнительный анализ данных наземных биоиндикационных исследований и значений вегетационных индексов, рассчитанных по космическим снимкам Landsat. Анализ показал достаточно приемлемое соответствие результатов дистанционной оценки изменений состояния лесной растительности данным биоиндикационных наземных исследований.

**Ключевые слова:** атмосферное загрязнение, биоиндикация, космический снимок, вегетационный индекс.

### Введение

Использование санитарно-гигиенических нормативов, основанных на предельно-допустимых концентрациях, в задачах экологического мониторинга не является достаточно обоснованным. Поэтому для оценки экосистемных изменений в условиях техногенных воздействий в последнее время предлагается использовать методы биоиндикации (Кокорина и др., 2009). Однако их использование требует проведения достаточно трудоемких и долговременных наземных исследований. Это особенно проявляется в организации экологического мониторинга техногенных воздействий нефтедобычи на природную среду Сибири. Так, в связи с труднодоступностью и высокой степенью заболоченности территории нефтедобычи Западной Сибири тестовые участки (ТУ) для проведения наземных биоиндикационных исследований для оценки влияния загрязнения атмосферы, возникающего в результате сжигания попутного газа на нефтяном месторождении, как показано в (Кокорина и др., 2009), удалось выбрать только в непосредственной близости от автодорог. Более того, существующие в практике отечественной нефтедобычи ограничения доступа исследователей на территорию месторождения определяют возможность получения крайне ограниченного числа доступных мест отбора образцов в наземных исследованиях. Такой информационный дефицит ТУ не позволяет в полной мере исследовать изучаемую территорию и, в частности, создает возможность существенного искажения оценки экологических изменений. Поэтому единственной альтернативой наземным исследованиям на основе методов биоиндикации могут служить дистанционные исследования, основанные на использовании космических снимков (КС).

Однако вопросы их применения для оценки экологических изменений в задачах мониторинга разработаны недостаточно. В связи с этим целью настоящей работы явилось изучение возможности проведения дистанционной оценки экосистемных изменений, возникающих в таежной зоне Западной Сибири в условиях воздействия атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа в факельных установках на нефтяных месторождениях.

### **Краткое описание и анализ результатов наземных (биоиндикационных) исследований**

В (Кокорина и др., 2009) представлены результаты наземных биоиндикационных исследований изменения состояния лесной растительности в таежной зоне Западной Сибири с использованием кедра и ели сибирской в качестве биоиндикаторов. Для исследований были выбраны 13 тестовых участков в левобережном Приобье, которые находятся в зоне воздействия Приобского месторождения – одного из наиболее крупных месторождений на территории Ханты-Мансийского автономного округа. Добыча нефти на этом месторождении поддерживается на достаточно высоком уровне; при этом в факелях сжигается ежегодно до 2 млрд кубометров попутного газа.

Выбранные тестовые участки биоиндикационных исследований находились в сходных эколого-фитоценотических условиях, но на разном удалении (от 0,4 до 16,5 км) от факельной установки как источника выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Согласно (Кокорина и др., 2009), на каждом ТУ производился отбор побегов 2-го порядка ветвления из средних частей крон с 20 деревьев кедра и ели одного возраста (60–80 лет) для количественного определения биоиндикационных показателей, характеризующих состояние деревьев и древостоя: индекс состояния древостоя, индексы состояния лесообразователей – сосны сибирской и ели сибирской, охвоенность побегов текущего и прошлого года обеих пород, масса 100 шт. хвоинок первого и второго года жизни сосны сибирской и ели сибирской, продолжительность жизни хвои и длина прироста побегов ели сибирской. Масса хвои отражает процесс накопления органических веществ, ее уменьшение в зонах поражения и свидетельствует о снижении активности фотосинтеза (Кокорина и др., 2009; Полищук и др., 2011).

Результаты наземных исследований в зоне воздействия Приобского месторождения с использованием 13 биоиндикационных показателей достаточно подробно описаны и проанализированы в (Кокорина и др., 2009). Для проведения сравнения с результатами дистанционного определения вегетационных индексов ниже рассматриваются два наиболее важных с точки зрения экологического мониторинга биоиндикационных показателя – охвоенность побегов и масса хвоинок для кедровых деревьев. Графики зависимости этих показателей от расстояния до источника техногенного загрязнения атмосферы приведены на *рис. 1*, где обозначено: ОТ и ОП, МТ и МП – охвоенность (О) и масса (М) хвои, определенные для побегов приростов текущего (Т) и прошлого (П) годов. Как видно на *рис. 1*, наиболее чутко реагируют на уменьшение степени загрязнения по мере удаления от факельной установки

побеги первого года жизни кедра: охвоенность побегов и масса хвои демонстрируют рост при увеличении расстояния до источника загрязнения – от 0,760 г/см до 0,947 г/см и от 2,971 до 4,196 г, соответственно.

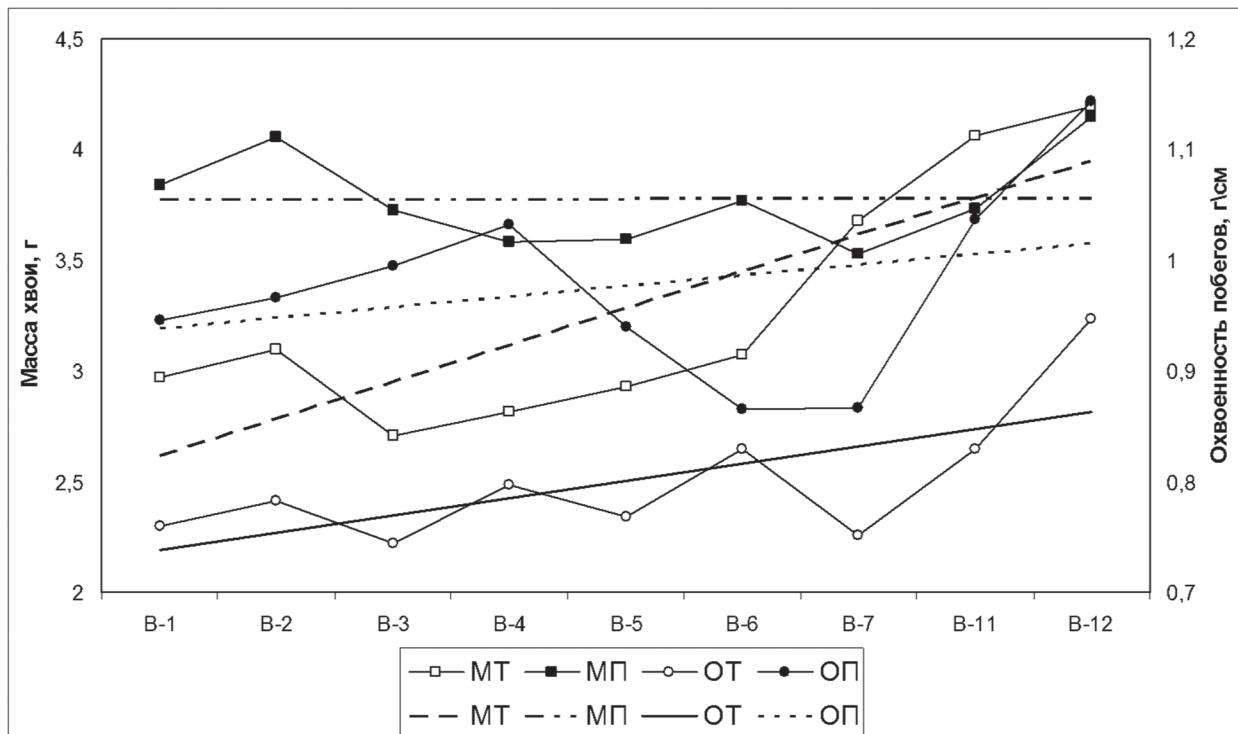


Рис. 1. Зависимость массы хвои и охвоенности побегов кедра от расстояния до источника загрязнения: B1 – 0,4 км от факела; B2 – 0,7 км; B3 – 1 км; B4 – 1,3 км; B5 – 1,7 км; B6 – 2 км; B7 – 4,5 км; B11 – 8,5 км; B12 – 16,4 км в восточном направлении

Показатели массы хвои и охвоенности побегов другого лесообразователя – ели сибирской – проявляют аналогичное поведение, а именно: с удалением от факельной установки они увеличиваются.

Однако в связи с труднодоступностью территории нефтедобычи в качестве перспективного рассматривается использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Как показано в (Токарева, Касьянов, 2011), наиболее удобным индикатором состояния растительного покрова являются вегетационные индексы (ВИ), определяемые по космическим снимкам (Черепанов, 2011).

### Методические вопросы дистанционного определения вегетационных индексов

Ниже кратко излагаются основные результаты дистанционных исследований состояния хвойных насаждений таежной зоны в зоне воздействия Приобского месторождения, где проведены наземные биоиндикационные исследования, описанные выше. В качестве объектов дистанционного исследования (Токарева, Касьянов, 2011) использованы участки территории, идентифицированные на космическом снимке как кедровые выделы.

Выделы отображаются на цифровой карте в виде полигонов векторного слоя, полученного в результате классификации и векторизации данных КС Landsat с датой съемки 19.06.1988 г. Полигоны выбраны в местах расположения тестовых участков для отбора образцов в наземных биоиндикационных исследованиях. Снимок 1988 г. использован в качестве исходного, потому что эксплуатация Приобского месторождения в это время только-только начиналась и воздействие факелов еще не успело проявиться в изменении состояния древостоя.

Для оценки изменений состояния кедровых выделов в настоящей работе использован вегетационный индекс NDVI (Черепанов, 2011), рассчитанный по разновременным космическим снимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м) 1988 и 2001 гг. Индекс NDVI в настоящее время широко применяется для определения изменений состояния растительного покрова по разновременным снимкам, например, в сельском хозяйстве, где значительные изменения состояния растительности происходят за сравнительно короткие промежутки времени. Ниже приведена формула для расчета используемого индекса:

$$NDVI = \frac{P_{nir} - Pred}{P_{nir} + Pred},$$

где  $P_{nir}$  – значения спектральной яркости пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра;  $Pred$  – в красном диапазоне спектра.

На рис. 2 для иллюстрации показана картосхема, визуализирующая значения NDVI на территории вблизи Приобского месторождения. На картосхеме пустые кружочки изображают расположение пунктов отбора образцов для биоиндикации, показывающих также и расположение полигонов кедровых выделов на снимке, для которых определенные значения вегетационного индекса использовались в дальнейшем анализе.

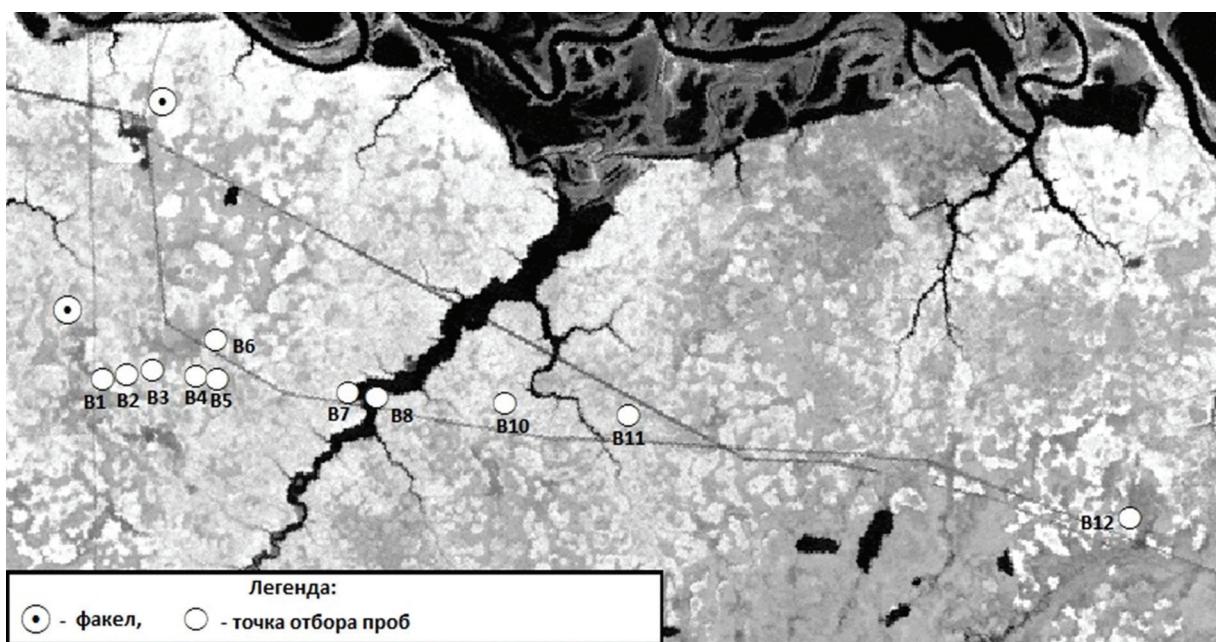


Рис. 2. Картосхема значений NDVI с нанесенными на нее пунктами биоиндикационных исследований

Для обработки КС с целью выявления изменений в состоянии кедровых насаждений и определения NDVI использован программный пакет ERDAS Imagine, ориентированный на профессиональную обработку данных аэро- и космических съемок. Векторизация классифицированного снимка произведена с использованием средств, предоставляемых геоинформационной системой ArcGIS. Для пространственного и статистического анализа данных использован дополнительный модуль Spatial Analyst в составе этой системы. Этот модуль, в частности, содержит функцию «Зональная статистика», позволяющую вычислять статистические параметры по значениям пикселей растрового слоя, попадающих внутрь выбранных полигонов векторного слоя.

Для каждого выбранного полигона рассчитывалось среднее значение NDVI по разновременным снимкам, затем для оценки динамики состояния кедровых выделов определялась величина относительного изменения среднего значения вегетационного индекса в каждом полигоне по формуле:

$$\delta = \frac{(\text{ВИ}_{2\text{cp}} - \text{ВИ}_{1\text{cp}})}{\text{ВИ}_{1\text{cp}}},$$

где  $\text{ВИ}_{1\text{cp}}$  и  $\text{ВИ}_{2\text{cp}}$  – средние значения вегетационного индекса NDVI для каждого полигона, рассчитанные по более раннему (1) и позднему (2) снимкам, соответственно.

Далее зависимость величины относительного изменения вегетационного индекса  $\delta$  от расстояния до факела использовалась для выявления влияния факельного сжигания попутного газа как источника техногенного воздействия на растительный покров.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены изменения абсолютных и относительных величин средних значений NDVI в зависимости от расстояния до факела. Эти значения определены по космическим снимкам 1988 и 2001 гг. как средние в пределах границ выделенных полигонов на снимках.

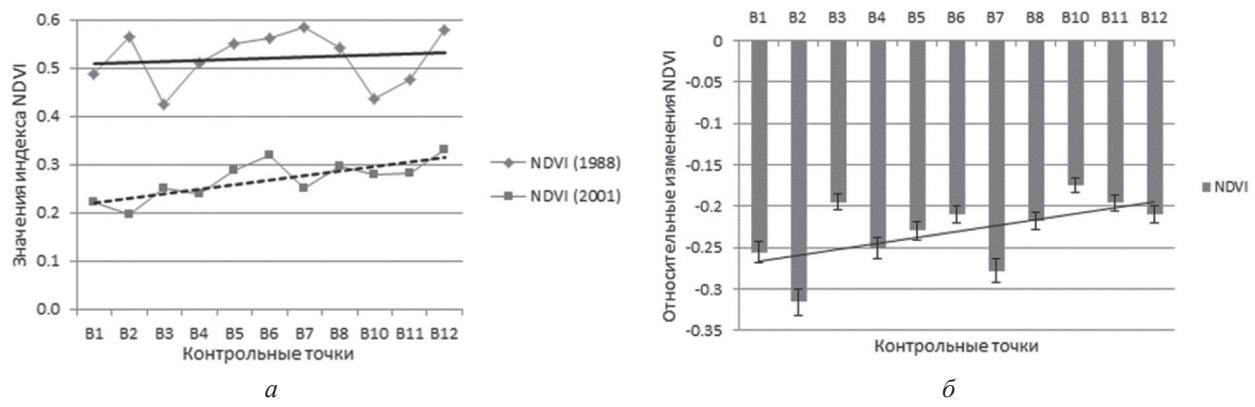


Рис. 3. Изменения значений вегетационного индекса NDVI в зависимости от расстояния до факельной установки: а – значения NDVI; б – относительные изменения NDVI; тестовые участки: B1 – 0,4 км; B2 – 0,7 км; B3 – 1 км; B4 – 1,3 км; B5 – 1,7 км; B6 – 2 км; B7 – 4,5 км; B8 – 5 км; B10 – 7 км; B11 – 8,5 км; B12 – 16,4 км в восточном направлении от факела

Как видно на *рис. 3а*, абсолютные величины NDVI по данным 2001 г. в среднем уменьшились по сравнению с данными 1988 г. Это уменьшение абсолютных значений NDVI подтверждается также данными (*рис. 3б*) об относительном изменении вегетационного индекса и может рассматриваться как ухудшение (угнетение) состояния кедровых насаждений к 2001 г. под воздействием хронического загрязнения атмосферного воздуха в результате многолетнего сжигания попутного газа в факелах на исследуемом нефтяном месторождении.

Рассмотрим зависимость изменения NDVI от расстояния до факела. Как видно на *рис. 3а*, линия тренда, относящаяся к 1988 г., практически параллельна оси абсцисс, что показывает отсутствие заметных изменений в состоянии растительности на разных удалениях от факела. Однако наклон линии тренда, относящейся к 2001 г., заметно увеличивается (по сравнению с 1988 г.), что соответствует увеличению значения индекса (т.е. улучшению состояния кедровых насаждений) по мере удаления от факела. Таким образом, поведение трендов изменения ВИ показывает, что степень угнетения кедровых насаждений наибольшая при малом удалении от факела (см. пункты В1, В2 и В3 на *рис. 3а*), а при удалении от факела и состояние растительности улучшается.

Проведенные дистанционные исследования показали, что тренды вегетационного индекса выявляют те же тенденции в негативных изменениях в состоянии хвойных насаждений, что и описанные выше результаты наземных биоиндикационных исследований. Следовательно, сравнение результатов наземных и дистанционных исследований изменения состояния лесной растительности в таежной зоне показывает возможность замены трудоемких и долговременных наземных биоиндикационных исследований более доступными дистанционными исследованиями, что крайне важно в условиях труднодоступности таежных территорий Сибири.

## Заключение

Проведенное сравнение трендов средних значений вегетационного индекса NDVI и трендов биоиндикационных показателей по данным (Кокорина др., 2009), показало достаточно приемлемое соответствие результатов дистанционной оценки изменений состояния лесной растительности данным биоиндикационных наземных исследований в таежной зоне. Это иллюстрирует возможность замены трудоемких и долговременных наземных исследований техногенных воздействий на растительность более доступными дистанционными данными, что крайне важно в условиях труднодоступности таежных территорий Сибири. Полученные результаты исследований могут быть использованы для оценки и картографирования зон экологических рисков (пренебрежимого, приемлемого и неприемлемого) воздействия источников загрязнения атмосферного воздуха при сжигании попутного газа на нефтяных месторождениях. Методология оценки и картографирования этих зон изложена в нашей работе (Полищук и др., 2011).

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные кадры инновационной России» (проект по Государственному контракту от 20 сентября 2010 г. № 14.740.11.0409).

## Литература

1. Кокорина Н.В., Касаткин А.М., Полищук Ю.М. Биоиндикация атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа в факелях на нефтяных месторождениях в среднетаежной зоне Западной Сибири // Вестник Тюменского госуниверситета. 2009. № 3. С. 65–72.
2. Полищук Ю.М., Кокорина Н.В., Кочергин Г.А., Перемитина Т.О., Токарева О.С. Методология оценки экологического риска воздействия точечных источников атмосферного загрязнения на основе данных биоиндикации // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8. № 4. С. 22–35.
3. Токарева О.С., Касьянов И.В. Оценка динамики состояния растений-биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вестник науки Сибири. 2011. № 1. Серия 6. С. 268–272. Электронный ресурс: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/57/104>.
4. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.

### **Comparative analysis of results of remote determination of vegetation indices and bioindicative research data in environmental monitoring**

**O.S. Tokareva<sup>1</sup>, Y.M. Polishchuk<sup>2,3</sup>**

*<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

*E-mail: ostokareva@gmail.com*

*<sup>2</sup>Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansijsk, Russia*

*E-mail: Yu\_Polishchuk@ugrasu.ru*

*<sup>3</sup>Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia*

*E-mail: yupolishchuk@gmail.com*

Problems of using vegetation indices determined on base of remote sensing data from space to assess the industrial impact of chemical pollution on the state of conifer trees as bioindicators in taiga zone are considered. Studies has been carried out in the zone of impact of flare for gas burning located on the Priobskoe oil field. A comparative analysis of data of ground bioindicative research and vegetation indices calculated from satellite images Landsat is performed. Analysis has shown acceptable correspondence the results of remote assessment of forest vegetation changes to data of ground bioindicative research.

**Keywords:** atmospheric pollution, bioindication, satellite image, vegetation index.