

УДК 504.06;519.876.5

Использование космических снимков для экологической оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях Сибири

Ю.М. Полищук¹, О.С. Токарева^{2*}

¹Институт химии и нефти СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 4

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634004, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 3.03.2014 г.

Проведен сравнительный анализ результатов биоиндикационных исследований изменения состояния деревьев-биоиндикаторов в зоне загрязнения атмосферного воздуха в результате сжигания попутного газа на Приобском нефтяном месторождении и оценок, полученных на основе вегетационных индексов, определяемых по космическим снимкам. Показано достаточно приемлемое соответствие результатов дистанционной оценки изменений состояния лесной растительности данным биоиндикационных наземных исследований в таежной зоне.

Ключевые слова: атмосферное загрязнение, биоиндикация, космический снимок, вегетационный индекс; air pollution, bioindication, space image, vegetation index.

Введение

Опыт использования данных дистанционного зондирования в экологическом мониторинге показал достаточную эффективность применения космических снимков в задачах определения ландшафтной структуры лесоболотных комплексов при оценке воздействия загрязнения атмосферы в результате сжигания попутного газа на нефтедобывающих территориях Западной Сибири [1–3]. В [1] с использованием многозонального снимка со спутника «Ресурс-О1» (пространственное разрешение 150×150 м) построена карта ландшафтной структуры территории и определены площади лесоболотных выделов. Разделение лиственных, светлохвойных (сосновых) и темнохвойных лесов проводилось путем анализа снимка с помощью привлечения «учителей», полученных на основе лесотаксационных планов. В качестве объектов исследования выбраны [1, 2] два участка территории нефтедобычи в таежной зоне на западе Томской области, на которых расположены Васюганская и Игольско-Таловая группы месторождений.

Оценка воздействия загрязнения атмосферы на лесные выделы осуществлялась путем наложения на карты ландшафтной структуры границ зон загрязнения и определения относительных площадей загрязненных частей лесных выделов. Результаты

расчетов относительной величины площади загрязненных ландшафтных выделов в зависимости от объема сжигаемого попутного газа для Васюганской группы месторождений, расположенных в таежной зоне Томской области, показали, что 4-кратный рост объемов сжигаемого газа сопровождается 5–6-кратным ростом относительной площади загрязненных ландшафтных выделов. Зоны загрязнения в [1–3] рассчитывались на основе санитарно-гигиенических нормативов, основанных на предельно допустимых концентрациях, и с учетом реальных объемов выбросов из факельных установок на территории месторождений.

Однако использование санитарно-гигиенических нормативов, основанных на предельно допустимых концентрациях, в задачах экологической оценки техногенных воздействий не является достаточно обоснованным. Поэтому для оценки экосистемных изменений в таежной зоне Сибири в условиях техногенных воздействий в последнее время предлагается [4] применять методы биоиндикации. Однако их использование требует проведения достаточно трудоемких и долговременных наземных исследований, что особенно проявляется в организации экологического мониторинга техногенных воздействий нефтедобычи на природную среду Сибири.

В связи с высокой степенью заболоченности территории нефтедобычи Западной Сибири тестовые участки для проведения наземных биоиндикационных исследований [4] для оценки влияния загрязнения атмосферы, возникающего в результате

* Юрий Михайлович Полищук (yupolishchuk@gmail.com);
Ольга Сергеевна Токарева (ostokareva@gmail.com).

сжигания попутного газа на нефтяном месторождении, удалось выбрать только в непосредственной близости от автодорог. Более того, существующие в практике отечественной нефтедобычи ограничения допуска экологов и других исследователей на территорию месторождения определяют возможность получения крайне ограниченного числа доступных мест отбора образцов в наземных исследованиях. Возникающий в результате этого дефицит тестовых участков не позволяет в полной мере исследовать изучаемую территорию и, в частности, создает возможность существенного искажения оценки экологических изменений.

В связи с изложенным единственной альтернативой наземным биоиндикационным исследованиям могут служить дистанционные измерения, основанные на использовании космических снимков (КС). Однако вопросы их применения для непосредственной оценки экологических изменений в задачах мониторинга разработаны недостаточно. В настоящей статье рассмотрены вопросы непосредственной 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 [4] представлены результаты наземных биоиндикационных исследований изменения состояния лесной растительности в таежной зоне Западной Сибири с использованием кедр и ели сибирской в качестве биоиндикаторов. Были выбраны 13 тестовых участков на территории таежной зоны в левобережном Приобье, которые находятся в зоне воздействия Приобского месторождения — одного из наиболее крупных нефтяных месторождений на

территории Ханты-Мансийского автономного округа. Добыча нефти на этом месторождении до настоящего времени поддерживается на достаточно высоком уровне, при этом в факелах сжигается ежегодно до 2 млрд м³ попутного газа.

Выбранные тестовые участки биоиндикационных исследований находились в сходных эколого-фитоценологических условиях, но на разном удалении (от 0,4 до 16,5 км) от факельной установки как источника выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Согласно [4] на каждом тестовом участке производился отбор побегов 2-го порядка ветвления из средних частей крон с 20 деревьев кедр и ели одного возраста (60–80 лет) для определения совокупности биоиндикационных показателей, характеризующих состояние деревьев и древостоев: 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 свидетельствует о снижении активности фотосинтеза [4, 5].

Результаты наземных исследований в зоне воздействия Приобского месторождения с использованием 13 биоиндикационных показателей достаточно подробно описаны и проанализированы в [4, 6]. Далее в настоящей статье рассматриваются результаты исследований наиболее важных с точки зрения экологического мониторинга двух биоиндикационных показателей — охвоенность побегов и масса хвоинок, полученных с использованием 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.

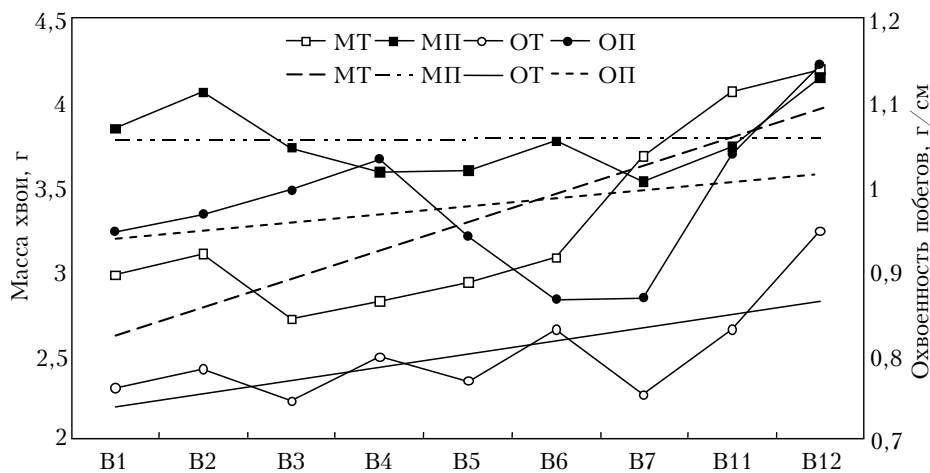


Рис. 1. Зависимость массы хвои и охвоенности побегов кедр от расстояния до источника загрязнения: В1 — 0,4; В2 — 0,7; В3 — 1; В4 — 1,3; В5 — 1,7; В6 — 2; В7 — 4,5; В11 — 8,5; В12 — 16,4 км в восточном направлении и от факела

Видно, что 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 до 0,947 г/см и от 2,971 до 4,196 г соответственно (см. рис. 1).

Показатели массы хвои и охвоенности побегов другого лесообразователя – ели сибирской – проявляют аналогичное поведение по мере удаления от стационарного источника загрязнения, т.е. с удалением от источника загрязнения они увеличиваются.

Методические вопросы дистанционного определения вегетационных индексов

Как следует из вышеизложенного, в связи с труднодоступностью исследуемой территории нефтедобычи в Западной Сибири перспективным для получения экологических оценок техногенных воздействий рассматривается использование космических снимков. Как показано в [7–9], наиболее удобным индикатором состояния растительного покрова являются вегетационные индексы (ВИ) [10].

Ниже кратко излагаются основные результаты дистанционных измерений состояния хвойных насаждений таежной зоны на тех же участках в зоне воздействия Приобского месторождения, что и в вышеописанных наземных биоиндикационных исследованиях.

В качестве объектов дистанционного исследования [8] использованы участки территории, идентифицированные на КС 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 для наземных биоиндикационных исследований, описанных выше. Карта-схема расположения тестовых участков на исследуемой территории приведена в [4]. Снимок 1988 г. выбран в качестве контрольного, так как в это время эксплуатация Приобского месторождения только-только начиналась и воздействие факелов еще не успело проявиться в изменении состояния древостоя.

Для оценки изменений состояния кедровых выделов в настоящей статье использованы вегетационные индексы NDVI и ARVI [10], рассчитанные 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. Другой индекс ARVI, использующий величину яркости отражения в синей зоне, рассматривается в [10] как устойчивый к влиянию атмо-

сферы. Ниже приведены формулы для расчета указанных индексов:

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

$$ARVI = \frac{P_{nir} - P_{blue}}{P_{nir} + P_{blue}},$$

где P_{nir} – значения спектральной яркости пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне, P_{red} – в красном, P_{blue} – в синем.

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

$$\delta = \frac{(VI_{2cp} - VI_{1cp})}{VI_{1cp}}. \quad (1)$$

Здесь VI_{1cp} и VI_{2cp} – средние значения вегетационного индекса для каждого полигона, рассчитанные по более раннему (1cp) и позднему (2cp) снимкам соответственно.

Далее зависимость величины относительного изменения вегетационных индексов δ от расстояния до факела использовалась для определения влияния факельного сжигания попутного газа как источника техногенного воздействия на растительный покров.

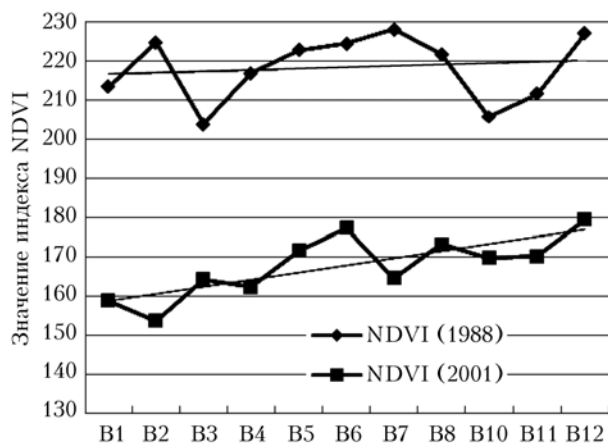
Результаты и их обсуждение

На рис. 2 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.

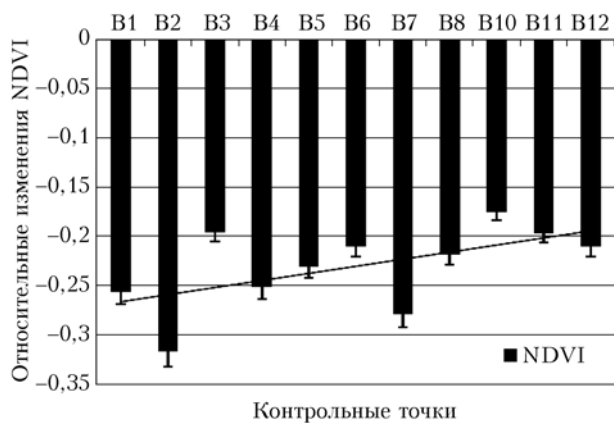
Как видно на рис. 2, *a*, абсолютные величины NDVI по данным 2001 г. в среднем уменьшились по сравнению с данными 1988 г. Это уменьшение абсолютных значений вегетационного индекса, составляющее в среднем приблизительно 23% для NDVI, подтверждается также данными (рис. 2, *б*) об относительном изменении индексов 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 вегетационных индексов от расстояния до факелов. Линия тренда (см. рис. 2, *a*), относящаяся к 1988 г., практически параллельна оси абсцисс, что показывает отсутствие заметных изменений в состоянии растительности на разных удалениях от факелов. Однако наклон линии тренда, по данным 2001 г., заметно увеличивается (по сравнению с 1988 г.), что соответствует увеличению индекса (т.е. улучшению состояния кедровых насаждений) по мере удаления

от факелов. Рис. 2, б подтверждает ту же тенденцию роста в среднем относительных значений изменения индекса при удалении от факела, что и рис. 2, а.



а



б

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

Анализ данных об абсолютных и относительных изменениях другого исследуемого вегетационного индекса ARVI выявил аналогичную зависимость трендов абсолютных и относительных изменений индекса при удалении от факела, что и индекс NDVI. Следовательно, поведение трендов абсолютных и относительных изменений индексов показывает, что степень угнетения кедровых насаждений наибольшая при близком расположении к факелу (см. пункты B1, B2 и B3 на рис. 2), а при удалении от факела состояние растительности улучшается.

В таблице приведены относительные величины изменения VI, рассчитанные по формуле (1). Видно, что данные 2001 г. для обоих индексов значительно превышают соответствующие величины для 1988 г. Это указывает на существенное воздействие

сжигания попутного газа на состояние лесных комплексов. Сопоставление данных об изменении индексов NDVI и ARVI (см. таблицу) свидетельствует об их согласованности во времени, однако индекс NDVI проявляет несколько большую чувствительность к техногенным воздействиям.

Относительные величины изменения вегетационных индексов

Год	NDVI	ARVI
1988	0,019	0,017
2001	0,12	0,08

Приведенные результаты дистанционных исследований показали, что тренды вегетационных индексов выявляют те же тенденции в негативных изменениях состояния хвойных насаждений, что и описанные выше результаты наземных биоиндикационных исследований. Таким образом, сравнение результатов наземных и дистанционных измерений изменения состояния лесной растительности в таежной зоне демонстрирует возможность замены трудоемких и долговременных наземных биоиндикационных исследований более приемлемыми дистанционными, что крайне важно в условиях труднодоступности таежных территорий Сибири.

Заключение

Проведенное сравнение трендов средних значений индексов вегетации и трендов биоиндикационных показателей по данным [4] выявило 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 измерениями, что крайне важно в условиях 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 [11]. Методология оценки и картографирования этих зон изложена в [4].

1. Булгакова И.В., Полищук Ю.М., Токарева О.С. Оценка воздействий загрязнений атмосферы на лесные комплексы в нефтедобывающих районах с применением космоснимков // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 504–507
2. Полищук Ю.М., Токарева О.С., Булгакова И.В. Оценка воздействий нефтедобычи на лесоболотные экосистемы с использованием космоснимков среднего разрешения // Сиб. экол. ж. 2005. № 1. С. 3–11.
3. Полищук Ю.М., Березин А.Е., Дюкарев А.Г., Токарева О.С. Экологическое прогнозирование воздействий

- нефтегазового комплекса на природную среду Западной Сибири с использованием ГИС-технологий // Геог. и природ. ресурсы. 2001. № 2. С. 43–49.
4. *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 // Пробл. анализа риска. 2011. Т. 8, № 4. С. 22–35.
 5. *Кокорина Н.В., Касаткин А.М., Полищук Ю.М.* Биоиндикация атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа в факелах на нефтяных месторождениях в среднетаежной зоне Западной Сибири // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. 2009. № 3. С. 65–72.
 6. *Алексеев А.С.* Мониторинг лесных экосистем. СПб.: ЛТА, 1997. 116 с.
 7. *Алексеева М.Н., Перемитина Т.О., Яценко И.Г.* Оценка экологических рисков аварийных разливов нефти с использованием спутниковых данных // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 525–530.
 8. *Токарева О.С., Касьянов И.В.* Оценка динамики состояния растений-биоиндикаторов атмосферного загрязнения на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вестн. науки Сибири. Сер. 6. 2011. № 1. С. 268–272. URL: <http://sjs.tpu.ru>
 9. *Сваровская Л.И., Яценко И.Г., Алтунина Л.К.* Электромагнитный спектр светового потока для оценки антропогенного загрязнения растительности на территории нефтедобывающих комплексов // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 332–335.
 10. *Черепанов А.С.* Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
 11. *Полищук Ю.М., Токарева О.С.* Оценка экологического риска воздействия атмосферного загрязнения на растительность // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 717–721.

Yu.M. Polishchuk, O.S. Tokareva. The use of satellite images for ecological estimate of flare firing of gas at oil fields of Siberia.

A comparative analysis is carried out of results on changes of bioindicative tree state in the area of air pollution as a result of gas flaring at Priobskoe oil field and estimates derived from vegetation indices determined from satellite images. Acceptable matching of results of remote assessment of forest changes with data of bioindicative ground research in the taiga zone is shown.