

# Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISAT MERIS и SPOT Vegetation

М.А. Корец <sup>1</sup>, В.А. Рыжкова <sup>1</sup>, С.А. Барталев <sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН  
660036 Красноярск, Академгородок, 50/28  
E-mail: [mik@ksc.krasn.ru](mailto:mik@ksc.krasn.ru)*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований РАН,  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mail: [bartalev@d902.iki.rssi.ru](mailto:bartalev@d902.iki.rssi.ru)*

В работе приводятся результаты использования данных спутниковой съемки ENVISAT MERIS и SPOT Vegetation для оценки состояния растительности в зоне воздействия источника загрязнения промышленными выбросами (Норильского ГМК). Оценка текущего состояния растительности выполнялась с использованием хлорофилльного индекса МТСИ (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index). С целью выявления временных трендов нарушения растительного покрова были проанализирован временной ряд изображений SPOT Vegetation за период 1998 – 2004 гг. Полученные результаты являются пространственной основой для зонирования территории по степени загрязнения выбросами промышленных предприятий.

Система мониторинга состояния растительного покрова в зонах промышленных воздействий должна базироваться на комплексном подходе: оценке всех важнейших компонентов природных систем и анализе интегральных показателей состояния их биотических компонентов (растительности, почв, животного населения) во взаимосвязи с характеристиками и параметрами абиотических факторов (атмосферы, вод, рельефа и др.). Решение подобного рода задач требует обработки большого объема как наземной, так и дистанционной информации и наиболее перспективно на основе ГИС, которая открывает широкие возможности для систематизации, хранения, актуализации и сопряженного анализа таких сложно организованных данных, как пространственные и функциональные характеристики наземных экосистем на разных территориальных уровнях.

Состояние растительных сообществ, произрастающих в условиях промышленного загрязнения, зависит как от степени воздействия поллютантов непосредственно на растения, так, во многом, и на условия местообитания, в которых эти сообщества формируются и функционируют.

В естественных условиях разнообразие растительных сообществ определяется в первую очередь степенью дренированности местообитаний, расчлененностью поверхности, крутизной и экспозицией склонов.

Территория, подверженная техногенному воздействию со стороны предприятий ГМК «Норильский никель», очень разнообразна по геоморфологическим, геологическим, почвенным, климатическим условиям, что обуславливает формирование здесь специфического растительного покрова, представленного тундровыми, лесотундровыми и болотными типами растительности. Инвентаризация условий местообитания растительных сообществ является важным этапом при решении задач комплексной оценки состояния растительного покрова в целом. Такой подход обеспечивает возможность охватить исследованиями все природное разнообразие и экстраполировать данные, полученные на ключевых участках, на всю территорию в пределах природно-территориальных аналогов.

Для решения задач, связанных с комплексной оценкой состояния наземных экосистем района исследований, сформирован компьютерный банк данных, включающий информацию о важнейших компонентах природных систем. Систематизация разнородной информации, ее пространственная и временная привязка осуществлялась на основе технологии геоинформационных систем (ГИС).

Банк данных ГИС содержит цифровую картографическую основу нескольких масштабных уровней, растрово-векторную модель рельефа местности, материалы космической съемки (мультиспектральные

изображения SPOT Vegetation, ENVISAT MERIS и Landsat 7 ETM+), данные спектральной аэрофотосъемки, базу данных наземных измерений, различные тематические карты исследуемой территории.

Составными частями банка данных являются тематические базы данных (БД), объединенные в пять основных групп: БД основных компонентов природных систем (геоботаническая, почвенная, зоологическая, лесоводственная); БД факторов внешней среды (топографическая, геоморфологическая, климатическая, гидрологическая); БД природно-территориальных комплексов (ландшафтная, лесорастительных условий); БД техногенных нарушений; БД дистанционного зондирования (данные аэро- и космосъемки).

Совмещение и сопряженный анализ разных информационных слоев ГИС позволяет осуществлять автоматизированное дешифрирование дистанционных материалов, корректную интерпретацию полученных результатов, более объективно проводить экстраполяцию выявленных закономерностей на прилегающие территории.

Для мониторинга состояния растительного покрова исследуемой территории были использованы данные спутниковой съемки низкого и среднего разрешения, обладающие широкой зоной захвата и достаточной периодичностью съемки. Концентрация хлорофилла в фотосинтетически активных зеленых частях растений, являющаяся косвенным показателем актуального состояния растительного покрова, может быть оценена по положению красной (инфракрасной) границы зоны поглощения хлорофилла [1]. При этом большей концентрации хлорофилла соответствует смещение границы в сторону более длинных волн. Положение красной границы поглощения может быть рассчитано по значениям отражательной способности соответственно в красном и ближних инфракрасных спектральных каналах спутниковых изображений при помощи так называемых зональных отношений или вегетационных индексов [2]. Такие признаки для данного класса земной поверхности инвариантны по отношению к широкому кругу факторов окружающей среды. В настоящее время предложен большой набор различного рода вегетационных индексов. На практике чаще всего используется нормированный разностный вегетационный индекс (NDVI).

Для комплексной оценки состояния растительности по уровню содержания хлорофилла на территорию района исследований были использованы данные спутниковой съемки ENVISAT MERIS и SPOT Vegetation, соответственно среднего и низкого пространственного разрешения. Данные программируемого спектрометра MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) [3] в узких спектральных каналах ближнего инфракрасного диапазона сделали возможным картирование территории по уровню содержания хлорофилла в растительности по состоянию на июль 2004 г. В свою очередь ретроспективный анализ временного ряда изображений SPOT Vegetation позволил оценить пространственное распределение тренда NDVI за период 1998 – 2004 гг.

Нами использовались изображения MERIS FR (Full Resolution Geophysical Product) с разрешением 300x300 м. На исследуемую территорию было отобрано 5 изображений (сцен) с датами съемки: 24-07-2004, 25-07-2004, 28-07-2004, 29-07-2004, 30-07-2004.

Для визуального анализа сцен на основе значений отражательной способности базовых спектральных каналов (1 - 7) видимого диапазона были сформированы композитные изображения RGB. Полученные RGB-композиты с достаточно широким охватом в коротковолновой (синей) области спектра позволили оценить длину и характер распространения видимого дымового шлейфа. За проанализированный период съемки (с 24 по 30 июля 2004 г.) его направление менялось в створе угла близкого к 180° в южном направлении от Норильска. В широких диапазонах изменялись также степень рассеяния и однородность шлейфа.

Картирование состояния растительности выполнялась с использованием хлорофилльного индекса MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) [4]:

$MTCI = (R_{Band10} - R_{Band9}) / (R_{Band9} - R_{Band8})$ , где  $R_{Band10}$ ,  $R_{Band9}$ ,  $R_{Band8}$  - значения относительной отражательной способности в 10, 9 и 8 спектральных каналах MERIS с центрами в 753.75 nm, 708.75 nm и

681.25 nm соответственно. Величина индекса МТСИ характеризует положение так называемой красной границы поглощения солнечной радиации (REP – red-edge position) [1] и практически линейно связана с концентрацией хлорофилла в пологе растительности. Индекс МТСИ был рассчитан как 5-дневный композит (по критерию максимума МТСИ) на основе исходных мультиспектральных изображений MERIS. Ранжирование диапазона изменения МТСИ позволило выделить на изображении зоны различной степени нарушенности растительного покрова вблизи источника загрязнения (рис. 1). Низкие значения МТСИ и, следовательно, невысокая концентрация хлорофилла соответствуют наиболее нарушенной территории вблизи Норильска и по долине р. Рыбная. Однако следует учитывать, что снижение содержания хлорофилла обуславливается и естественными орографическими факторами, например, в горных районах.

С целью выявления временных трендов состояния растительности были привлечены данные спутниковой съемки SPOT Vegetation за период 1998 – 2004 гг. Нами использовались данные Vegetation в виде изображений, полученных как 10-дневные композиты по критерию максимума вегетационного индекса NDVI. Для дальнейшего анализа отбирались подекадные композиты, перекрывающие период вегетации с 1-го июня по 1-е октября. Таким образом, на каждый год (с 1998 по 2004) использовалось 13 подекадных изображений NDVI. Пространственное распределение тренда NDVI вычислялось попиксельно для стека из 91-го (13 декад × 7 лет) изображения NDVI, упорядоченных по датам декад. Изменение NDVI в % для каждого пикселя выходного изображения вычислялось в форме линейного тренда.

Максимальное снижение NDVI и, следовательно, содержания хлорофилла фиксируется в области удаленной от Норильска от 15 до 30 км, вытянутой в южном направлении. В этом районе фиксируется снижение среднего значения NDVI на протяжении 7-ти лет (1998-2004 гг.).

Выделенные области снижения вегетационного индекса NDVI (отрицательный тренд) за последние 7 лет, совмещенные с распределением хлорофилльного индекса МТСИ, являются пространственной основой для зонирования территории по степени нарушенности растительного покрова (рис. 1).

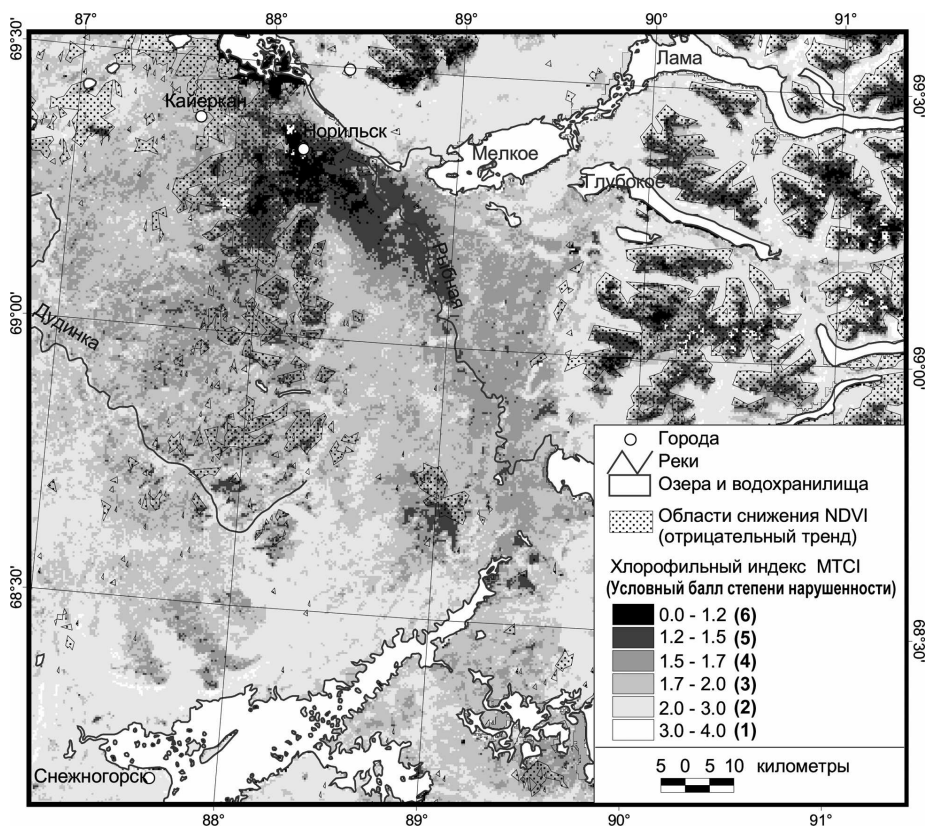


Рис. 1. Распределение хлорофилльного индекса МТСИ (по данным спутника ENVISAT MERIS, 2004 г.) и области снижения (отрицательного тренда) вегетационного индекса NDVI (по данным спутника SPOT Vegetation за период 1998 – 2004 гг.) для территории воздействия ГМК «Норильский никель»

Интерпретация результатов обработки космических снимков проводилась на основе их сопряженного анализа с тематическими базами данных ГИС, содержащими результаты наземных исследований, литературные и фондовые материалы, оригинальные и разработанные в ГИС тематические карты. Для этого разработаны качественные и количественные показатели, по которым последовательно осуществлялась оценка состояния растительного покрова исследуемой территории.

Качественная оценка функционального состояния растительного покрова проводилась на основе анализа фитоценологических параметров сообществ, диагностирующих техногенные деструкции на примере сообществ разных типов растительности (лесотундрового, тундрового, болотного) в равнинных и горных ландшафтах. В качестве критериев выбраны 15 показателей, характеризующих состояние всех ярусов сообщества (древесного, кустарникового, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового). По результатам сравнительно-географического анализа предложены условные баллы, отражающие степень нарушенности растительного покрова: 1 – ненарушенные сообщества (природный фон); 2 – слабо нарушенные; 3 – умеренно нарушенные; 4 – сильно нарушенные; 5 – очень сильно (тотально) нарушенные.

Количественные критерии оценки состояния растительного покрова разработаны на основе результатов химических анализов по содержанию серы и тяжелых металлов в растительных и почвенных образцах, а также в образцах снега. Результаты были приведены в сравнимую форму: для анализа использовалось не абсолютное значение содержания элемента, а его превышение (в указанное число раз) по сравнению с фоновым значением, то есть кратность превышения фонового содержания элемента.

Таким образом, были составлены сводные таблицы, в которых в сравнимом виде представлены показатели состояния разных компонентов природных систем. Эти данные далее были подвергнуты автоматизированной обработке и комплексному многомерному анализу.

Проведена пространственная экстраполяция точечных данных. Возможности ГИС позволяют комбинировать общепринятые статистические методы обработки табличных данных полевых измерений с технологией сопряженного пространственного анализа разнородных геоданных, включающих помимо дистанционных материалов, тематическую информацию из банка данных ГИС и цифровую модель рельефа местности (ЦМР).

Разработаны множественные линейные регрессионные модели для аппроксимации превышений фоновых значений содержания тяжелых металлов и серы в различных компонентах наземных экосистем. Модели далее использовались для пространственной экстраполяции величины превышений содержания серы, никеля и меди на территорию района исследований. Превышение рассчитывалось для каждого пикселя растрового слоя как функция от растровых слоев независимых переменных модели. Результат представлен в виде растровых карт превышений.

Во всех моделях (как для серы, так и для тяжелых металлов) у древесных растений (лиственница, ель) ярко выражено южное и юго-восточное направление смещения максимумов превышения, что совпадает с направлением летней розы ветров.

Для анализируемых элементов по диапазонам варьирования показателей превышений фоновых значений выделены пять уровней загрязнения территории. Каждому участку присвоены соответствующие условные баллы уровня загрязнения по сере, меди и никелю. Балльные оценки уровня загрязнения территории тяжелыми металлами и серой, на основании данных химических анализов растительных и почвенных образцов, а также образцов снега, и условные баллы степени нарушенности растительного покрова по результатам наземных обследований ключевых участков представлены в сводной таблице. По ним построены множественные линейные регрессионные модели аппроксимации значений условного балла уровня загрязнения территории тяжелыми металлами и серой.

Карты расчетных зон загрязнения по меди и никелю отражают те же закономерности, что и карты превышений фоновых значений содержания элементов в образцах разных видов растений. Отличия существуют только в ширине зон разной степени загрязнения, что может быть объяснено разной устойчивостью видов, их физиологическими особенностями и другими причинами.

Наиболее интересна модель, отражающая зоны загрязнения территории серой. Очень четко выделились зоны очень сильной (5) и сильной (4) нарушенности растительного покрова, которые безошибочно идентифицируются как при визуальном обследовании территории с вертолета, так и на космическом снимке. Можно предполагать, что сера является главным фактором, влияющим на состояние растительности и обуславливающим ее гибель в зоне наиболее сильного загрязнения.

Карты, составленные автоматизированным способом, безусловно, имеют ряд погрешностей, но играют важную роль для экстраполяции точечных наземных данных при оценке территории по степени нарушенности растительного покрова.

На заключительном этапе с использованием всех перечисленных материалов экспертным путем выполнено зонирование территории по степени нарушенности растительного покрова. В качестве основы использована карта хлорофилльного индекса МТСИ. Низкие значения МТСИ соответствуют наиболее нарушенной территории вблизи Норильска и по долине р. Рыбная. Невысокая концентрация хлорофилла, а главное, снижение его содержания (отрицательный тренд NDVI) может быть косвенным показателем ухудшения состояния растительного покрова. Полная гибель древесного и кустарникового ярусов или снижение их сомкнутости, дигрессивное оголение грунтов и снижение проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса наблюдается повсеместно в зонах 4 и 5.

Однако, следует учитывать, что снижение содержания хлорофилла обуславливается и естественными факторами, что мы и наблюдаем в горных территориях. Такой же эффект могут давать и гари. Поэтому для выделения зон использовались в комплексе все имеющиеся материалы, в том числе топографические карты 50-60-х годов, на которых отражены природные ландшафты, еще не подверженные техногенному воздействию.

Сопряженный анализ имеющихся данных в ГИС позволил выявить зоны различной степени загрязнения территории тяжелыми металлами и серой по состоянию растительного покрова. Для комплексной оценки состояния природных систем необходимо использовать данные по содержанию поллютантов в атмосфере, состоянию вод, почв и животного населения. Решение перечисленных задач имеет важное значение для разработки региональных научно-обоснованных экологических нормативов предельно допустимых уровней выбросов вредных веществ промышленными предприятиями в окружающую среду.

## Литература

1. *Clevers, J. G. P. W., et al.* Derivation of the Red Edge Index using the MERIS Standard Band Setting // *International Journal of Remote Sensing*, 2002. Vol. 23. P. 3169-3184.
2. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем // М.: Наука, 1994. 320 с.
3. *Curran P.J., Steele C.M.* MERIS: The Re-branding of an Ocean Sensor // *International Journal of Remote Sensing* (submitted), 2004.
4. *Jadunandan Dash, et al.* MTCI: The MERIS Terrestrial Chlorophyll Index // *ENVISAT Symposium Proceedings*, Austria, Salzburg, 2004.
5. Ландшафтная карта СССР. Масштаб 1:2500000. Под редакцией И.С. Гудилина // Москва, 1987.