

Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия

М.И. Василевич, В.В. Елсаков, В.М. Щанов

*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН
Сыктывкар 167982, Россия
E-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru*

В статье представлены результаты, демонстрирующие возможности использования материалов спутниковых съемок для оценки изменения состояния растительных фитоценозов в зоне воздействия выбросов Сыктывкарского лесопромышленного комплекса (СЛПК). В работе выполнена классификация типов растительности, оценен вклад каждого класса. Проведена оценка точности классификации по полевым точкам. Значительную долю территории занимают вторичные лиственные леса (15,9 %), что связано с высокой освоенностью территории. Рассчитаны изменения значений индекса NDVI для оценки запасов биомассы и сомкнутости крон за период 1986–2013 гг. Показано наличие трендов снижения NDVI в среднем на 0,2 % в год в течение 24 лет. Анализ изменений сомкнутости крон за весь период исследования показал, что среднее значение уменьшения сомкнутости на контрольных участках за весь период с 1986 по 2013 гг. составило 15 %. Наибольшее уменьшение сомкнутости наблюдается в основном в еловых и заболоченных сосновых фитоценозах в зоне наибольшего воздействия выбросов. Воздействие выбросов предприятия распространяется на расстояние 15 км от основного источника выбросов по доминирующему направлению розы ветров.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования (ДДЗ), мониторинг растительных фитоценозов, воздействие выбросов.

Введение

В настоящее время данные дистанционного зондирования (ДДЗ) являются наиболее важным источником информации во многих сферах человеческой деятельности, в т.ч. при оценке пространственно-временных закономерностей распределения структурных и функциональных параметров естественных и нарушенных антропогенной деятельностью природных систем и для получения оперативных данных экологического мониторинга (Барталев и др., 2000; Елсаков, Щанов, 2005; Елсаков, 2007; Черепанов, Дружинина, 2009; Epstein, 2009; Liang et al., 2008).

Среди главных задач, решаемых при проведении космического экологического мониторинга, можно выделить оценку состояния растительных фитоценозов, подверженных различным видам антропогенного воздействия.

Хвойные древесные фитоценозы, доминирующие в северном полушарии, благодаря значительной листовой поверхности являются хорошим поглотителем аэрозольных загрязнений атмосферного воздуха, служа естественным аккумулятором и препятствуя распространению загрязнения в окружающей среде. Однако, при длительном воздействии выбросов изменяется ход роста, снижается устойчивость и ухудшается санитарное состояние лесов, меняется их структура, уменьшается сомкнутость крон (Лесные, 1990).

Для исследования была выбрана залесенная территория вблизи СЛПК – одного из крупнейших предприятий целлюлозно-бумажного производства в европейской части России. Преобладающие компоненты в выбросах комбината – карбонатно-сульфатная пыль, оксиды серы, углерода, азота. Основными показателями загрязнения в жидкой фазе являются Na^+ , SO_4^{2-} (при условии перехода сульфата натрия при эмиссии в растворимые сульфаты), NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , повышение содержания которых в жидкой фазе снега могут быть следствием поступления азотсодержащих соединений техногенного характера.

Благодаря высоким дымовым трубам выбросы разносятся на расстояние до 20–30 км, однако осаждение сульфат-ионов вместе с сульфатной пылью происходит за 0,5–1,5 км, а нитрат-ионов с аэрозольными частицами – за 2–3 км от источника эмиссии (Пчелинцев, 1982). Расчет рассеивания выбросов СЛПК показал, что максимальная концентрация этих ингредиентов превышает ПДК на расстоянии до 18 км, причем в радиусе 10 км от источника эмиссии превышение по SO_3 составляет 4 ПДК и по неорганической пыли – 3 ПДК (Лесные, 1990).

Исследователями Института биологии КНЦ УрО РАН (Торлопова, Робакидзе, 2003) проводилась оценка структуры и состояния сосновых и еловых фитоценозов в зоне действия СЛПК в период 1995–2001 гг. Результаты полевых наблюдений показали снижение прироста стволовой древесины и жизненного состояния древостоев, ухудшение состояния подроста и растений напочвенного покрова, наблюдается дехромация хвои и дефолиация кроны деревьев.

Цель данной работы – оценить влияние выбросов СЛПК на состояние хвойных фитоценозов, расположенных в зоне их воздействия с использованием дистанционных методов исследований.

Материалы и методы

Для оценки состояния древостоя в зоне влияния выбросов СЛПК использовали летние и зимние снимки спутников Landsat TM 4-5, Landsat 8 OLI с пространственным разрешением 30 м за период с 1986 по 2013 гг.

Предобработку материалов спутниковых изображений высокого разрешения Landsat провели общепринятыми методами, включая пространственную, радиометрическую и топо-коррекцию (Liang et al., 2008). Выделение основных классов растительного покрова для анализа особенностей их пространственной приуроченности проводили по изображению Landsat TM 5, полученному для 22.06.2011 методом решающих правил или «пороговой» классификации. Проверка классификации проведена по контрольным точкам, выделенным при полевых исследованиях.

При обработке изображений использовали принципы декомпозиции спектральных смесей (метод SMA, *Spectral Mixed Analysis*), исходя из положения, что доля компонент при этом принимается пропорционально их площади в проекции на земную поверхность (Epstein, 2009). Это позволяет количественно оценить вклад отдельных компонент в отражательную способность элементов изображения. В качестве «чистых компонент» использовали параметры, полученные для открытых пологих заснеженных участков (сомкнутость крон равна 0) и характеристики участков с максимально сомкнутым древостоем (сомкнутостью крон 0,9-0,95). Общий принцип оценки доли отдельных компонент для линейного смешивания спектров проводили согласно выражению:

$$DN_c = \sum_{i=1}^n F_i \cdot DN_{ic} + E_c,$$

учитывая следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1; 0 \leq F_i \leq 1,$$

где DN_c – числовое выражение значения пиксела в канале c , F_i – доля i -го эталона в смеси, DN_{ic} – числовое выражение значений i -го эталона в смеси в канале c , n – количество эталонов, E_c – ошибка оценки для канала c .

Достоверность выявления показателей сомкнутости возрастает при использовании зимних изображений, что, с одной стороны, связано с маскированием многих форм микро-рельефа земной поверхности снежным покровом (Елсаков, Щанов, 2005), с другой, – с отсутствием листвы и погребением лишайниково-мохового, травяно-кустарничкового и частично кустарничкового яруса, что приводит к большей контрастности исследуемых компонент. Расчёт значений компоненты «сомкнутости древостоев» для пикселей изображения по крайним элементам значений (0 и 100 %) выполнен с использованием возможностей программного пакета ERDAS Imagine 9.0. Абсолютное доминирование в формировании значений «древесной» компоненты на модельных участках относится к ели европейской.

Калибровка построенной модели и проверка её точности выполнена на основании анализа сходимости полученных величин и пространственно привязанных данных, зафиксированных с использованием GPS приёмника, фотографической камеры Canon EOS-550D и объектива «Fish-eye» в ходе полевых исследований модельного участка. Между полученными показателями отмечена значимая положительная коррелятивная связь ($r^2 = 0,86$), максимальное отклонение значений 10 % (среднее 6 %) (рис. 1).

Итогом обработки зимних изображений 1986–2013 гг. стали тематические карто-схемы, отражающие показатель сомкнутости древесного яруса (%) для отдельных лет на-

блюдений. Результаты обработки легли в основу расчёта интенсивности изменения показателя по 5 изображениям (22.03.1986, 10.04.1987, 02.04.2002, 14.04.2003, 24.03.2013 гг.).

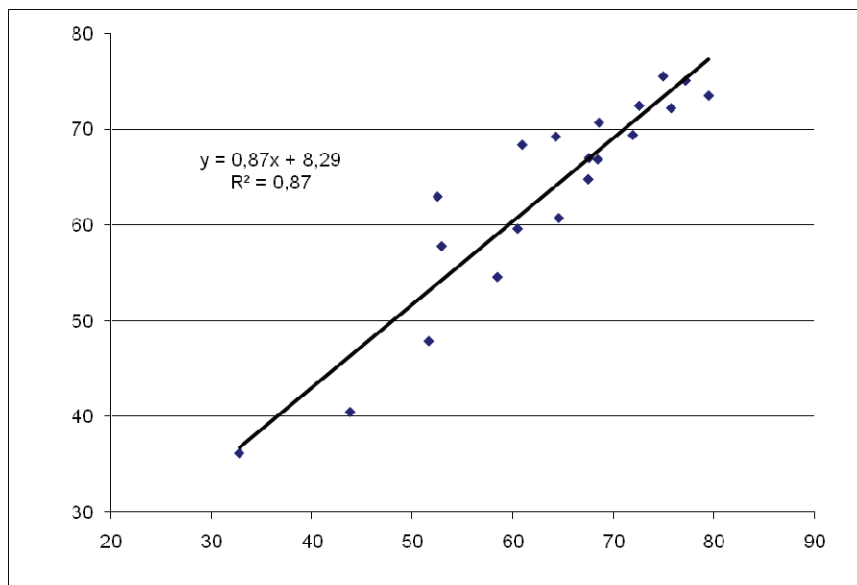


Рис. 1. Зависимость между рассчитанными по снимку (ось абсцис) и полученными по полевым данным (ось ординат) значениям показателя сомкнутости крон

Приблизительную оценку распределения запасов фитомассы и их изменение в исследуемых фитоценозах проводили на основании расчета и сравнения значений нормализованного вегетационного индекса (NDVI):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR – значение отражения в ближней инфракрасной области спектра, RED - отражение в красной области спектра. NDVI простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы поэтому напрямую коррелирует с значениями хлорофилльного индекса (ChlI). Отмечена связь между величинами NDVI и наземной фитомассой в виде логарифмических и линейных зависимостей (Алексеев, Сваткова, 2008; Елсаков, Щанов, 2005; Елсаков, 2007; Черепанов, Дружинина, 2009; Liang et al., 2008). Все это позволяет рассматривать спектральные показатели и широко используемый индекс NDVI в качестве величин, отражающих интенсивность фотосинтетически обусловленных CO₂ – потоков, а их сезонную вариабельность как показатель продуктивности. Важно отметить, что значение ChlI в лесных сообществах средней тайги определяется автотрофной (в спелых еловых насаждениях до 82 %, хвойно-лиственных 85 %) частью древостоя, с продвижением к северу данный показатель снижается (Воронин и др., 1995; Тужилкина, Бобкова, 2010). Таким образом, при определении динамики изменения индекса NDVI в лесных фитоценозах в основном оценивается изменение фотосинтетической активности

именно древесных ярусов леса на уровне кронообразующего слоя, вклад нижних ярусов мало значителен.

На основании 10 летних снимков рассчитали средние отрицательные к-тренды изменений индекса NDVI за 24 года и выявили общую динамику изменения данного показателя.

Результаты

В ходе выполнения управляемой классификации выделено 18 классов земной поверхности, из них 16 приходится на разные типы растительного покрова на выделенной территории площадью 119 тыс.га (табл. 1). Доминирующие лесные фитоценозы, включающие в себя древесные породы – ель европейскую (*Picea obovata*), сосну (*Pinus silvestris*), берёзу повислую (*Betula pendula*), осину (*Populus tremula*); в пойме рек расположены фитоценозы с доминированием ивы (*Salix* sp.).

Таблица 1. Классы растительности, выделенные по снимку Landsat TM 5 (22.06.2011 г.)

Класс растительности	тыс. га	% от общей площади
Сосняк чернично-зеленомошный с примесью ели	19,1	16,0
Лиственный лес (береза, ива, осина) с низкой долей хвойных	19,0	15,9
Ельник чернично-зеленомошный с примесью сосны	15,3	12,9
Сосняк сфагновый	12,4	10,4
Ельник зеленомошный	12,1	10,1
Травяные ассоциации влажные	7,6	6,4
Сосняк лишайниковый	7,0	5,8
Сосняк бруснично-лишайниковый	3,4	2,8
Сосняк бруснично-зеленомошный	3,1	2,6
Травяные ассоциации	2,6	2,2
Ельник бруснично-зеленомошный с примесью сосны	1,7	1,5
Сосняк багульниково-сфагновый	1,7	1,4
Ельник чернично-зеленомошный плотно сомкнутый	1,0	0,8
Березово-ивняковые ассоциации	0,9	0,7
Болота сфагновые, березово-ивняковые поросли	0,4	0,3
Травяные сообщества на болотах	0,2	0,2

Сообщества растительности – типичные для средней подзоны тайги, местами нарушенные сплошными вырубками и другими видами деятельности. Растительностью покрыто 90 % исследованной территории (рис. 2). Значительную долю занимают лиственные леса (15,9 %), что связано с высокой освоенностью территории – рубками. На данной территории сильно развито транспортное сообщение, расположены промышленные сооружения, а также несколько населенных пунктов. Все это помимо возможного влияния выбросов СЛПК определяет высокую антропогенную нагрузку на растительный покров территории исследования.

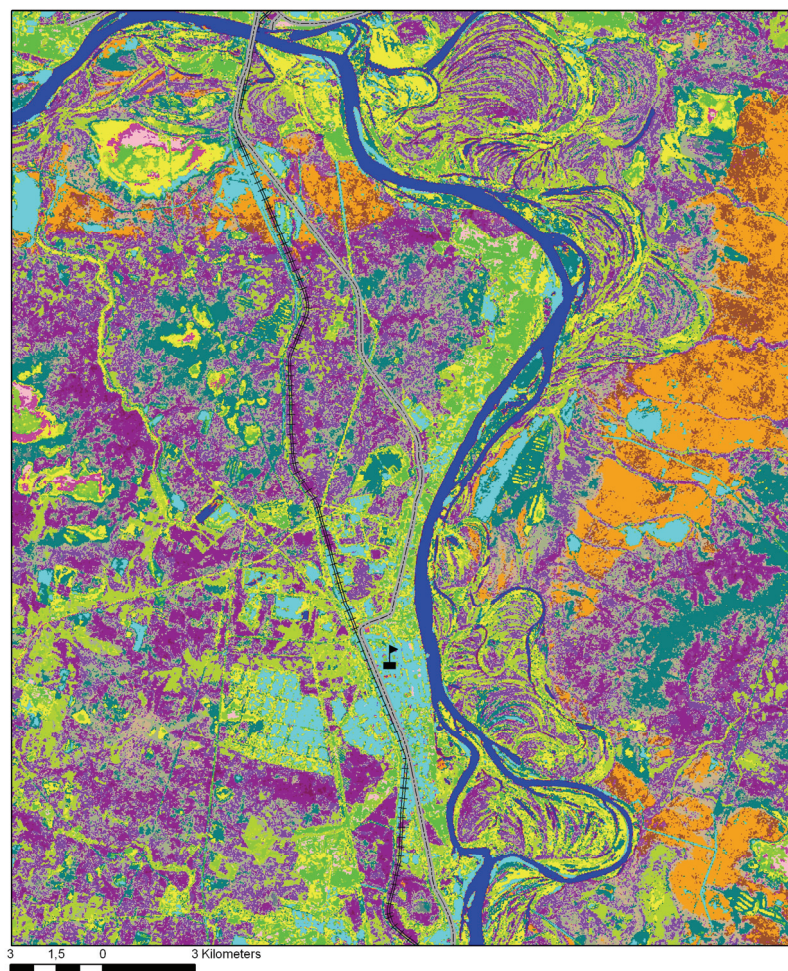


Рис. 2. Классификация растительности исследованной территории, выполненная по снимку Landsat TM 5 (22.06.2011 г.)

Сосновые ассоциации доминируют и в сумме составляют 39 % от всей растительности данного района. Еловые ассоциации представлены на 25 % выделенной территории с ельником чернично-зеленомошным с примесью сосны в большей доле.

Точность классификации проверена по контрольным полевым точкам с составлением матрицы ошибок, получено совпадение в 83 % случаев ($N=41$). Ошибки классификации наблюдались для следующих классов: ельник чернично-зеленомошный с примесью сосны (29 %, $n=7$), ельник бруснично-зеленомошный с примесью сосны (25 %, $n=4$), сосняк сфаг-

новый (25 %, $n=4$), сосняк бруснично-зеленомошный (37 %, $n=8$). Для еловых классов, где состав пород смешанный ошибка обусловлена увеличением доли сосны на локальных участках, где сосна составляет >50 % в структуре фитоценоза. Погрешность расположения основных классов главным образом связана с локальными изменениями в напочвенном покрове, при этом доминирующий породный состав согласуется с тем, что на местности.

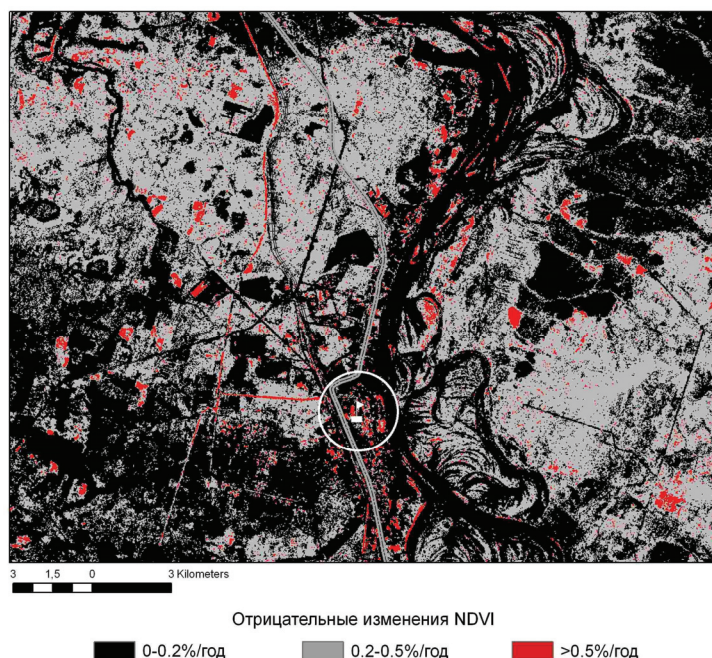


Рис. 3. Отрицательные изменения индекса NDVI за 1987–2011 гг.

Применение индекса NDVI для расчета распределения запасов фитомассы и их изменение в фитоценозах проводили на основании летних снимков (конец июня - начало июля) за период 1987–2011 гг. с использованием 10 снимков. Средние отрицательные изменения к-тренда показали, что на исследованной территории наибольшие изменения значений индекса наблюдаются на заболоченных участках вблизи СЛПК, а также в ельниках. Средние значения уменьшения запасов биомассы составили для этих сообществ 0,2 % год, т.е. за 24 года на 4,8 % соответственно (рис. 3). Цветом отмечены градации значений NDVI. Красным цветом отмечены участки с отрицательными изменениями, приуроченные к местам сплошной и выборочной рубки леса, дорогам, участкам меандрирования реки, что не связано с влиянием выбросов СЛПК.

Анализ сомкнутости древостоя методом SMA проводили для двух временных интервалов: 1986/1987–2002/2003 гг. и 2002/2003–2013 гг. Первый период – с 1986 по 2003 гг. связан с временем работы СЛПК до проведения реконструкции газоочистных сооружений. Введение оборудования позволило сократить выбросы предприятия на 20 % (Абрамова и др., 2006). Второй период представлен интервалом времени после реконструкции и до настоящего момента.

конкретно выделенных участках наибольшие изменения отмечены для ельников зеленомошных (30 %), сосняков чернично-зеленомошных с примесью ели (24 %) и ельников чернично-зеленомошных с примесью сосны (19 %). Доля других классов составила менее 10 % от общей площади.

На фоне интенсивных трансформаций фитоценозов, связанных с деятельностью человека, сукцессионными изменениями и влиянием водных объектов тенденции сокращения сомкнутости на выделенных участках выглядят не так заметно. Однако анализ методом SMA все же позволил установить изменения в сторону снижения сомкнутости крон.

Оценка изменений сомкнутости крон за период 2003–2013 гг. показала, что изменения сомкнутости за десять лет в этих же участках продолжают (рис. 4Б). В заболоченных фитоценозах уменьшение этого значения достигает 50 %. На тех же выделенных участках среднее значение уменьшения сомкнутости составило за десять лет 10 %.

Анализ изменений сомкнутости крон за весь период исследования показал, что среднее значение уменьшения сомкнутости на контрольных участках за весь период с 1986 по 2013 гг. составило 15 % (рис. 4В). Для более детального представления отрицательных изменений сомкнутости по классам приведена табл. 2.

Таблица 2. Отрицательные изменения сомкнутости крон в лесных фитоценозах выделенных участков

Лесные классы растительности	$\bar{x} \pm S(x)$, %		
	1986–2003	2003–2013	1986–2013
Сосняк чернично-зеленомошный с примесью ели	4,5±3,6	7,7±5,4	8,8±9,1
Лиственный лес (береза, ива, осина) с низкой долей хвойных	4,7±4,2	9,3±6,1	9,4±9,0
Ельник чернично-зеленомошный с примесью сосны	4,2±3,5	7,0±4,8	7,7±6,1
Сосняк сфагновый	4,4±5,7	7,1±7,5	13,1±13,8
Ельник зеленомошный	4,9±3,3	7,6±3,6	9,6±7,1
Сосняк лишайниковый	9,9±11,1	15,5±11,4	33,3±7,4
Сосняк бруснично-лишайниковый	23,9±7,9	5,5±4,3	30,2±9,6
Сосняк бруснично-зеленомошный	2,8±2,0	12,1±5,6	9,7±10,8
Ельник бруснично-зеленомошный с примесью сосны	4,4±4,2	7,1±5,8	9,7±8,5
Сосняк багульниково-сфагновый	7,5±4,7	8,0±8,7	9,8±4,7
Ельник чернично-зеленомошный плотно сомкнутый	4,5±3,3	7,5±3,8	13,2±5,6
Березово-ивняковые ассоциации	9,4±8,0	14,6±6,2	15,8±15,6
Среднее для лесных классов	6,4	8,0	14,0
Среднее для всех растительных классов	6,0	10,0	15,0

Средние значения отрицательных изменений сомкнутости для лесных классов за выбранные периоды согласуются со средними значениями для всех классов и весьма близки. Отрицательные изменения сомкнутости в большей степени отмечаются в сосновых ассоциациях, в сравнении с еловыми, что возможно обусловлено большей устойчивостью ели к газопылевым выбросам предприятия (Лесные, 1990).

Согласно расчету изменения сомкнутости методом SMA возможное негативное влияние выбросов на состояние древостоя достигает на выделенных участках расстояния 15 км от основного источника выбросов данного предприятия.

Одним из основных компонентов выбросов СЛПК в жидкой фазе, негативного влияющих на жизненное состояние древостоя являются сульфат-ионы, которые в составе кислых атмосферных осадков вызывают разреженность крон, усыхание верхушек и ветвей, негативно влияют на состояние подроста. Сульфат-ионы распространяются в снежном покрове не только в составе пыли, но и виде кислых аэрозолей.

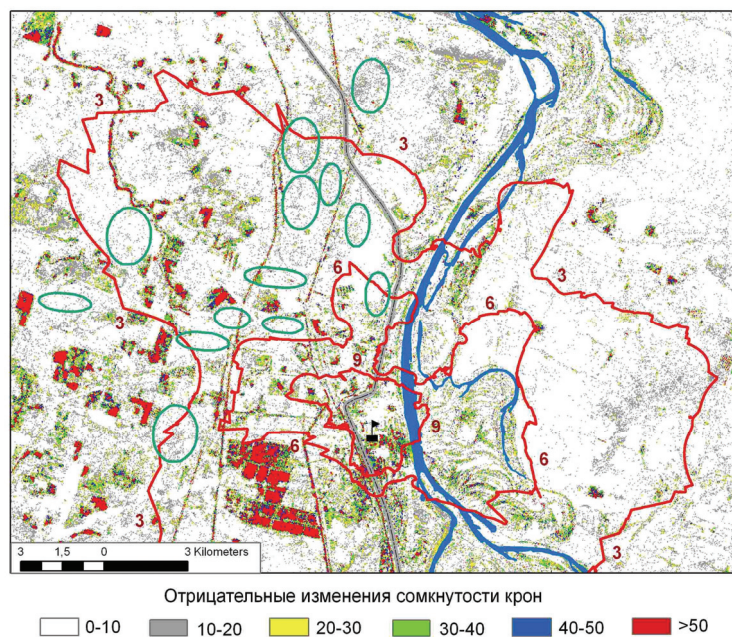


Рис. 5. Отрицательные изменения сомкнутости, основанные на расчетах индекса сомкнутости за 1986–2013 гг. с изолиниями, отражающими кратность превышения над фоном содержания в снеге сульфат-ионов в 2002–2007 гг.

Анализ химического состава снежного покрова вокруг СЛПК показал, что максимум поступления сульфат-ионов находится непосредственно вблизи от источника выбросов, а трехкратное превышение над фоном отмечено на расстоянии до 15 км. На основу распределения значений уменьшения сомкнутости крон за 1986–2013 гг. наложены контуры, отражающие кратность по распределению сульфат-ионов в снежном покрове над фоновыми значениями (в 3, 6, 9 раз, соответственно) (рис. 5).

Отмечено, что большая часть выделенных участков расположена в зоне 3х-кратного превышения содержания сульфат-ионов, где возможно негативное влияние на состояние древостоя.

Заключение

Таким образом, результаты обработки космоснимков позволили оценить изменения состояния растительных фитоценозов в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного предприятия. Данная территория на протяжении всего периода помимо действия выбросов была подвержена интенсивному воздействию хозяйственной деятельности: сплошным рубкам, деградации в результате строительства промышленных сооружений, дорог и др. Расчет индекса NDVI позволил установить снижение запасов биомассы в среднем на 0,2 %/год на участках леса, где не обнаружено другого антропогенного воздействия помимо эмиссии промышленных выбросов. Согласно оценке сомкнутости древостоя с 1986 по 2003 гг. среднее снижение составило на выделенных участках 6 %. Однако после проведенных в 2002 г. реконструкционных работ газоочистных сооружений значения сомкнутости продолжали снижаться на тех же участках за 10 лет в среднем на 10 %, что возможно обусловлено увеличением объемов производства. Среднее значение уменьшения сомкнутости за весь период с 1986 по 2013 гг. составило 15 %. По результатам исследования возможное воздействие выбросов предприятия может достигать расстояния 15 км от основного источника выбросов по доминирующему направлению розы ветров, что практически совпадает с оценкой распространения выбросов по анализу химического состава снежного покрова [4].

Литература

1. *Абрамова М.И., Кондратенко Б.Н., Безносиков В.А.* Мониторинг химического состава снежного покрова в зоне действия целлюлозно-бумажного предприятия // VII международная молодежная конференция «Севергеоэкотех»: Материалы конференции. 2006. С. 290–294.
2. *Алексеев Н.А., Сваткова Т.Г.* Зимние топографические карты // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 8–11.
3. *Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В.* Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Выпуск 6. Т. 2. С. 343–352.
4. *Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Габов Д.Н.* Органическое вещество снежного покрова в зоне влияния выбросов целлюлозно-бумажного предприятия // Водные ресурсы. 2009. № 2. С. 182–188.
5. *Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокронос А.Т.* Проектное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных зон России // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 2. С. 295–302.
6. *Елсаков В.В., Щанов В.М.* Особенности спектральных характеристик приморских лугов восточного побережья Малоземельской тундры // Биоразнообразие наземных и водных экосистем охраняемых территорий

- Малоземельской тундры и прилегающих районов. Сыктывкар, 2005. (Труды Коми научного центра УрО РАН, № 178). С. 148–159.
7. *Елсаков В.В.* Технологии спутникового мониторинга в исследовании лесных островов большеземельской тундры // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Выпуск 4. Том 2. С. 212–216.
 8. *Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение* / В.А. Алексеев, О.Г. Чертов, С.А. Сергейчик и др. Л.: Наука, 1990. С. 38–53.
 9. *Пчелинцев В.П.* Пространственная изменчивость загрязнения воздушного бассейна г. Сыктывкара по дымным о химическом составе снега // *Влияние деятельности человека на природную среду Коми АССР*. Сыктывкар, 1982. С. 103–114.
 10. *Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А.* Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы. Екатеринбург, 2003. 139 с.
 11. *Тужилкина В.В., Бобкова К.С.* Хлорофилльный индекс в фитоценозах коренных ельников Европейского северо-востока // *Лесной журнал*. 2010. № 2. С. 17–23.
 12. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности вегетационные индексы // *Геоматика*. 2009. № 3. С. 28–32.
 13. *Epstein H.E.* Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra // Abstract GC31A-0697, presented at AGU Fall Meeting. San Francisco. CA. December 14–18. 90:gc31A-0697. 2009.
 14. *Liang T., Zhang X., Xie H.* Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR-E measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2008. P. 3750–3761.

The use of satellite research methods in monitoring the state of forest communities in the area of industrial emissions

M.I. Vasilevich, V.V. Elsakov, V.M. Shchanov

Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS

E-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru

The paper demonstrates the possibilities to use satellite imagery to assess changes in the state of vegetable plant communities in the area affected by emissions from the Syktывkar Pulp and Paper Enterprise (SPPE). A classification of vegetation types is performed and the contribution of each class is assessed. The accuracy of the classification is verified based on field control points. A significant share of the territory is occupied by secondary deciduous forests (15,9 %), which is associated with high development of the territory. NDVI changes are calculated to assess biomass and crown density for the period of 1986–2013. A downward trend in NDVI index averaging 0,2 % per year for the past 24 years is revealed. Analysis of crown density changes during the study period shows that the average reduction in crown closeness in control areas for the entire period from 1986 to 2013 is 15 %. The largest decrease in closeness is observed mainly in spruce and pine wetland plant communities, worst affected by the emissions. The impact of the emissions of the enterprise extends to a distance of 15 km from the main source of emissions along the prevailing wind rose direction.

Keywords: remote sensing data, monitoring of plant phytocenoses, the impact of emissions.

References

1. Abramova M.I., Kondratenok B.M., Beznosikov V.A., Monitoring himicheskogo sostava snegnogo pokrova v zone deistviya cellulozno-bumagnogo predpriyatiya (Monitoring of chemical composition of snow cover in the zone of pulp and paper enterprises), *VII megdunarodnaya molodegnaya konferenciya "Severgeocoteh"*, Proc. Conf., Ukhta, 2006, pp. 290–294.
2. Alekseenko N.A., Svatkova T.G., Zimnie topographycheskie karty (Winter topographic maps), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5. Geographiya*, 2008, No. 3, pp. 8–11.
3. Bartalev S.A., Hovratovich T.S., Elsakov V.V., Ispolsovane sputnikovyh isobragenyi dlya ocenky poter' ugleroda lesnimy ecosystemamy v resul'tate vyrubok (Estimation of carbon losses in a forest ecosystem caused by logging with the use of satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 2, pp. 343–352.

4. Vasilevich M.I., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Gabov D.N., Organicheskoe veshchestvo snegnogo pokrova v zone vliyaniya vybrosov cellulosno-bumagnogo predpriyatya (Organic matter of snow cover in the zone of influence of emissions of pulp and paper enterprises), *Vodnie resursy*, 2009, No. 2, pp. 182–188.
5. Voronin P.U., Efimcev E.I., Vasiliev A.A., Vatkovsky O.S., Mokronosov A.T., Proektivnoe soderganie hlorophilla i bioraznoobrazie rastitel'nosti osnovnyh zon Rossii (Projective chlorophyll content and biodiversity main vegetation zones of Russia), *Physiologiya rasteniy*, 1995, Vol. 42, No. 2, pp. 295–302.
6. Elsakov V.V., Schanov V.M., Osobenosti spektralnykh harakteristik primorskykh lugov vostochnogo pobereg'ya Malozemel'skoi tundry (Peculiarities of the spectral characteristics of the seaside meadows of the Eastern coast of Malozemel'skaya tundra), *Bioraznoobrasie nazemnykh i vodnykh ecosystem ohranyaemykh territoriy Malozemel'skoy tundry i prilegaushykh rajonov, Syktyvkar, 2005, Trudy Komi nauchnogo centra UrO RAH*, No. 178, pp. 148–159.
7. Elsakov V.V., Technologii sputnikovogo monitoringa v isledovanii lesnykh ostrovov Bolshezemel'skoi tundry (Technologies of satellite monitoring in the study of forest islands of the Bolshezemel'skaya tundra), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Issue 4, Vol. 2, pp. 212–216.
8. V.A. Alekseev, O.G. Chertov, S.A. Sergeichik et al. In: *Lesnie ecosystemy i atmosfernoie zagraznenie* (Forest ecosystems and atmospheric pollution), Leningrad: Nauka, 1990, pp. 38–53.
9. Pchelincev V.P., Prostranstvennaya izmenchivost' zagrazneniya vozdušnogo basseina goroda Syktyvkara po dannym o himicheskom sostave snega (Spatial variability of air pollution of Syktyvkar from snow chemical composition data), *Vliyanie deyatel'nosti cheloveka na prirodnuu sredu Komi ASSR*, Syktyvkar, 1982, pp. 103–114.
10. Torloпова N.V., Robakidze E.A., *Vliyanie pollutantov na hvoinie phitocenosis* (Influence of pollutants on coniferous phytocenoses), Ekaterinburg, 2003, 139 p.
11. Tugilkina V.V., Bobkova K.S., Chlorophilnyi index v phitocenoazah korenykh elnikov Evropeiskogo severovostoka (Chlorophyll index in phytocenoses spruce forests of the European North-East), *Lesnoy jurnal*, 2010, No. 2, pp. 17–23.
12. Cherepanov A.S., Druginina E.G., Spektral'nye svoistva rastitel'nosti i vegetacionnye indexy (Spectral properties of vegetation and vegetation indexes), *Geomatika*, 2009, No. 3, pp. 28–32.
13. Epstein H.E., Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra, Abstract GC31A-0697, *AGU Fall Meeting*, San Francisco, CA, December 14–18, 90:gc31A-0697, 2009.
14. Liang T., Zhang X., Xie H., Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR-E measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2008, pp. 3750–3761.