

## Оценка состояния лесной растительности Красноярского края (заповедник «Столбы») по спутниковым данным

Т. И. Письман, И. Ю. Ботвич, А. П. Шевырнов

*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*  
*E-mails: tpisman@mail.ru, pech@ibp.ru, irina.pugacheva@mail.ru*

Проведено изучение изменчивости состояния лесной растительности на основе анализа многолетних рядов индекса NDVI (2003–2016) хвойных и лиственных древостоев и климата на территории Красноярского края (заповедник «Столбы»). Исходными данными являлись восьмидневная спутниковая информация Modis (продукт MOD09Q1) и метеорологическая информация с наземных метеостанций. Выявлено, что тренды усреднённых NDVI лесной растительности за период май – сентябрь и максимальных NDVI отрицательные. Анализ связи динамики NDVI лесной растительности и гидротермического фактора на территории заповедника в 14-летнем цикле выявил незначительную корреляционную зависимость между этими переменными. Отрицательный уклон трендов NDVI хвойных и лиственных древостоев указывает на деграционные процессы. Ухудшение состояния лесной растительности исследуемого района, обнаруженное по спутниковым данным, объясняется совокупностью факторов: изменением климата, антропогенным влиянием Красноярска и наличием старовозрастного леса.

**Ключевые слова:** заповедник «Столбы», хвойная и лиственная растительность, спутниковое зондирование, Modis, тренды NDVI, климат, антропогенные факторы

Одобрена к печати: 04.09.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-130-140

### Введение

Леса являются наиболее распространёнными и значимыми для биосферы экосистемами. Они вносят основной вклад в обеспечение кислородного баланса планеты. Особая роль в сохранении и управлении лесами принадлежит России, на долю которой приходится более 20 % лесного покрова Земли, в том числе более половины бореальных (таёжных) лесов (Исаев и др., 2014).

Необходимость осуществления регулярного мониторинга состояния лесов обусловлена их непрерывной динамикой вследствие влияния природных и антропогенных факторов (таких, как пожары, вырубки, техногенные загрязнения и др.), масштабы проявления которых существенно варьируют в зависимости от региона (Терехин, 2017; Bartalev et al., 2003; Cuevas-Gonzalez et al., 2009).

Для эффективного управления растительными ресурсами необходимо знать степень влияния внешних факторов на динамику растительности, самыми важными из которых являются климат и антропогенное воздействие (Пропастин, Муратова, 2006; Walther et al., 2002). Растительный покров, являясь наиболее динамичным компонентом, чутко реагирует на современные изменения глобального климата. Доказана тесная связь между увеличением зимних и весенних температур и положительным трендом условий вегетации за двадцатилетний период на глобальном (Kowabata et al., 2001; Tucker et al., 2001) и региональном (Xiao, Moody, 2004) уровнях.

Вторым важнейшим фактором, обуславливающим межгодовую динамику условий вегетации в аридных регионах, являются осадки (Пропастин, Муратова, 2006; Nightingale, Phinn, 2003). Отмечается тесная зависимость между величиной межгодовой изменчивости осадков и степенью их влияния на динамику растительного покрова.

Спутниковые съёмки в различных диапазонах спектра позволяют фиксировать текущие изменения в структуре растительного покрова, связанные с антропогенными воздействия-

ми и иными природными факторами (Барталев и др., 2015; Bartalev et al., 2003). Материалы спутниковых съёмок приобретают большую информативность по мере их накопления за разные годы. Эти данные незаменимы для мониторинга функционирования лесных экосистем и выявления их критических состояний (Шевырногов и др., 2012; Bartalev et al., 2003). Несомненным достоинством дистанционных методов исследований является пространственная непрерывность информации (в отличие от дискретных наземных наблюдений), а также возможность получения сведений о труднодоступных районах.

Согласно спутниковой информации, в динамике породной структуры лесов России наблюдается снижение доли хвойных и рост доли лиственных лесных массивов. Изменение породной структуры лесов обусловлено тем, что основные сплошнолесосечные рубки проводились в хвойных лесах, а естественное возобновление древостоев на вырубках и гарях происходило, как правило, со сменой преобладающих пород (Исаев и др., 2014).

Растительный покров территории, являясь основным звеном биоценоза, определяющим продуктивность экосистем, находится в тесной связи с физико-географическими и климатическими условиями. Развитие систем спутникового мониторинга фитоценозов расширило возможности анализа особенностей регионального распределения фитомассы, динамики сезонного развития, направленности и трендов межгодовых изменений количественных показателей растительного покрова (Елсаков, Телятников, 2013).

Наиболее популярный и часто используемый индекс — NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), нормализованный разностный индекс растительности, простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Индексы этой группы отражают общее количество растительности и используются для оценки её состояния. Главным преимуществом вегетационных индексов является лёгкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. На его основе возможно получение качественных данных для использования в оценках и прогнозировании продуктивности лесных массивов, биологического разнообразия, степени нарушенности и ущерба от различных стихийных бедствий, техногенных аварий и т. д. NDVI позволяет выявить проблемные зоны угнетённой растительности.

Во многих исследованиях, выполняемых для Красноярска, принято считать территорию заповедника «Столбы» фоновой, изолированной от выбросов промышленных источников. Однако существуют и другие результаты. Территория заповедника подвержена антропогенному влиянию, она находится в зоне влияния выбросов стационарных источников Красноярска (Хлебопрос и др., 2012). Поэтому актуально определение истинных причин изменения состояния лесных массивов данного района, т. е. необходимо изучить динамику растительного покрова.

Мониторинг состояния экосистем заповедных территорий ограничен строгим природоохранным режимом. В связи с этим для изучения различных экологических параметров, а также индикации состояния окружающей среды территорий с ограниченным режимом природопользования актуально отдавать предпочтение дистанционным методам исследования.

Целью работы является оценка состояния лесной растительности заповедника «Столбы» Красноярского края по спутниковым данным. Для этого проведён анализ многолетних рядов (2003–2016) усреднённых индексов NDVI хвойных и лиственных древостоев за период май – сентябрь, максимальных  $NDVI_{max}$  и климатических изменений (средних значений температуры воздуха и суммы осадков в период с мая по сентябрь).

## Объекты и методы исследований

### Характеристика района исследования

С целью изучения возможности адекватного мониторинга, а также индикации состояния лесных экосистем заповедных территорий в качестве объекта исследований выбран заповедник «Столбы». Интерес к растительному покрову территории обусловлен особенностями его

географического положения и сохранившимся фиторазнообразием: на небольшой территории встречаются почти все основные типы лесов.

В качестве тестовых участков выбраны лесные массивы, расположенные на территории заповедника «Столбы» (40 км от Красноярска, 55°38′–55°58′ с. ш., 92°38′–93°05′ в. д.). Государственный природный заповедник «Столбы» расположен на северо-западных склонах Восточного Саяна. Естественными рубежами охраняемой территории являются правые притоки Енисея: на северо-востоке — река Базаиха, на юге и юго-западе — реки Мана и Большая Слизнева. С северо-востока территория граничит с пригородом Красноярска.

Близость к черте города и наличие удивительных и часто посещаемых скал стали основанием для разделения территории заповедника на три части с различным охранным статусом: 3 % от общей территории занимает туристический район (открыт для посещения с условием соблюдения правил заповедника); 90 % — строго охраняемая, закрытая для посещения основная зона заповедника; и примерно 7 % площади заповедника занимает буферная зона между туристической и заповедной со строгим ограничением доступа (с разрешения администрации).

Заповедник расположен в области умеренного климатического пояса. Климат здесь резко отличается от пограничной лесостепи с повышением в полтора-два раза количества осадков (686 мм) и влажности воздуха, меньшей продолжительностью вегетационного периода (138 дней).

В заповеднике всего восемь лесообразующих пород: хвойные — лиственница сибирская (*Larix sibirica*), сосна обыкновенная (*Pinus silvestris*), пихта сибирская (*Abies sibirica*), ель сибирская (*Picea obovata*), кедр сибирский (*Pinus sibirica*) и лиственные — осина (*Populus tremula*), берёза белая (*Betula alba*) и берёза повислая (*Betula pendula*).

По литературным данным известно, что сосна занимает 41 %, пихта — 25 %, осина — 12–17 % всей лесной площади заповедника. Кедр присутствует в составе темнохвойных, площади под кедром не расширяются из-за конкуренции с пихтой. Ель занимает 7 % всей лесной площади заповедника, являясь спутником пихты. Ель расположена в речных долинах, где даже господствует. Берёза занимает 5 % всей лесной площади заповедника, распространена везде, но в основном — в поясе подтайги. Березняки в процессе сукцессии сменяются сосняками.

Для данных исследований в качестве тестовых участков выбраны лесные территории со следующими преобладающими породами деревьев: лиственные (берёза, осина) и хвойные (сосна, пихта, ель, кедр). Размеры тестовых участков варьируются от 2 до 7 пикселей. Основной вклад в формирование значений NDVI вносит первый ярус древесного полога, кроны которого занимают большую площадь. Тестовые участки с доминированием сосны, пихты и осины являются однородными. Такие виды, как берёза и кедр, встречаются здесь единично. Участок с елью однороден, так как расположен в долине реки Колокольня, где ель доминирует. На основе карты Экологического атласа заповедника «Столбы» (<http://stolby.torins.ru/main.php>) выбран тестовый участок с доминированием берёзы в районе рек Быковая и Роево. Площадь участка достаточно велика и составляет 7 пикселей, при этом он наиболее приближен к Красноярску. Хвойные породы деревьев встречаются здесь единично. По литературным данным известно, что если нет пожаров и вырубок, березняки в низкогорье и районе выходов сиенитов сменяются сосняками, т. е. сосна всегда присутствует вторым ярусом (Овчинникова и др., 2011). Доля сосняка не велика, что подтверждается ранневесенними значениями NDVI, которые находятся в пределах 0,3. Для хвойных древостоев значения NDVI — выше 0,5.

### Климатические данные

Многолетние ряды (1980–2016 и 2003–2016 гг.) усреднённой температуры воздуха и суммы осадков за период май–сентябрь были построены на основании данных метеостанции Опытное поле, Красноярск.

## Спутниковые методы

Изучение динамики спектральных оптических характеристик древесной растительности проводилось по спутниковым данным MODIS/Terra (продукты MOD09Q1, MOD09A1) в течение вегетационного периода 2003–2016 гг.

Исследование основывалось на восьмидневных данных видимых (459–479 нм, 3-й канал; 545–565 нм, 4-й канал; 620–670 нм, 1-й канал) и ближнего инфракрасного (841–876 нм, 2-й канал) каналов с пространственным разрешением 250–500 м (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Предварительная и тематическая обработка спутниковой информации производилась с помощью программного обеспечения ENVI, IDL (the Interactive Data Language).

В ходе предварительной обработки спутниковых снимков производилось:

- преобразование проекции снимков из проекции Sinusoidal projection в Universal Transverse Mercator (UTM) с помощью программы MODIS ReprojectionTool;
- построение маски выпавших значений: исключалась спутниковая информация, полученная при зенитном угле наблюдения более 40°, а также пиксели с облачным покровом и тенями от облаков с помощью алгоритма, предложенного И. А. Нейштадт (2006).

В результате предварительной обработки часть данных была исключена из анализа в связи с облачностью, превышением угла визирования и т. п. При изучении одного и того же склона на протяжении нескольких лет первостепенными являются только изменения самого древостоя, так как крутизна, экспозиция, тип почв и другие факторы остаются неизменными.

Для уменьшения статистической неоднородности были рассчитаны средние месячные значения. Анализ среднемесячных изменений позволяет выявлять основную тенденцию изменения параметра. Отражательная способность древесной растительности с доминированием хвойных пород деревьев в течение летнего периода изменяется незначительно, изменения происходят в мае и сентябре, когда происходит рост и увядание листопадной и травянистой растительности. В среднем в течение каждого месяца при расчёте средних были доступны как минимум два достоверных значения. На исследуемой территории в летнее время облачность значительно меньше, чем в мае и сентябре. В связи с этим в летние месяцы расчёт базируется на трёх-четырёх значениях, в мае – сентябре — в среднем на двух.

Для определения местоположения исследуемых тестовых участков использовали информацию Экологического атласа заповедника «Столбы» (<http://stolby.torins.ru/main.php>) и пространственную информацию снимков Spot-4 (пространственное разрешение 20 м).

## Результаты и обсуждение

Для оценки изменчивости состояния лесных массивов на территории заповедника «Столбы» построены и проанализированы многолетние ряды усреднённых индексов NDVI за период май – сентябрь и максимальных NDVI хвойных и лиственных древостоев. Анализ многолетней динамики средних значений NDVI хвойных и лиственных древостоев за период май – сентябрь выявил отрицательную направленность рядов за 2003–2016 гг. (рис. 1, см. с. 134). При этом наклон тренда для хвойных древостоев больше, чем для лиственных. Поскольку индекс NDVI является простым показателем количества фотосинтетически активной биомассы, то естественно сделать вывод, что за 14-летний период на исследуемой территории происходит уменьшение биомассы лесной растительности — как лиственной, так и хвойной.

В результате анализа трендов максимальных значений  $NDVI_{max}$  этих же лесных массивов также выявлена отрицательная направленность (рис. 2). Значения максимальных NDVI за июль превышают значения усреднённых NDVI за май – сентябрь, и это закономерно, так как значение NDVI отражает величину биомассы. Применимость индексов NDVI в количественной оценке биомассы доказана большим числом авторов. Кроме того, значения максимальных NDVI лиственных древостоев превышают значения максимальных NDVI хвойных древостоев (Саворский и др., 2013).

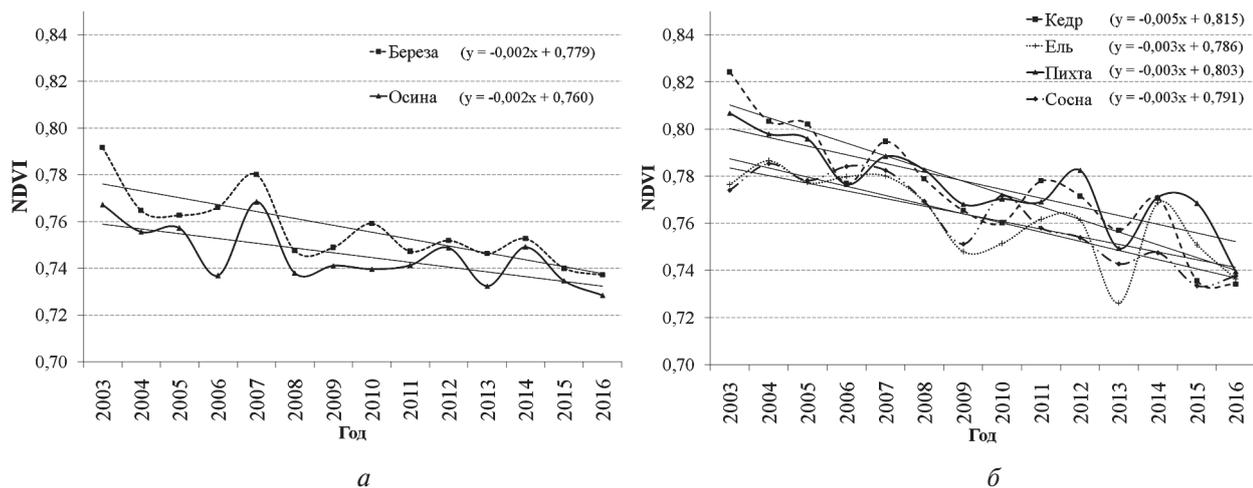


Рис. 1. Межгодовая изменчивость средней величины индекса NDVI лиственных (а) и хвойных (б) древостоев в течение периода вегетации (с мая по сентябрь)

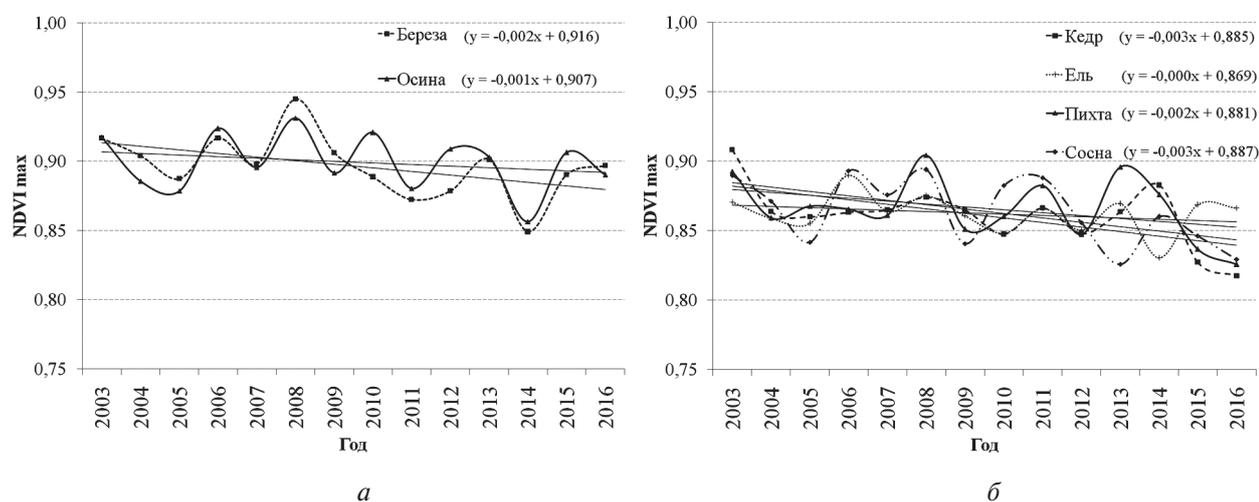


Рис. 2. Межгодовая изменчивость максимальной величины индекса NDVI<sub>max</sub> лиственных (а) и хвойных (б) древостоев

В летний период спектральные коэффициенты яркости лесных древостоев достигают своих оптимальных значений. Растительность имеет характерную спектральную кривую: высокое значение в зелёном участке спектра, падение в красном участке и очень высокий подъём в ближней ИК-области. Причина этого заключается в том, что на красную зону приходится максимум поглощения солнечной энергии хлорофиллом, а на ближний инфракрасный диапазон — максимум её отражения за счёт специфики клеточного строения листа. В ближней инфракрасной области коэффициент отражения растительности в большой степени зависит от строения листьев, и поэтому коэффициенты отражения лиственных и хвойных пород значительно различаются (Chernetskiy et al., 2011).

Наклон тренда максимальных индексов NDVI для хвойных древостоев по-прежнему превышает наклон тренда для лиственных. Это подтверждает тот факт, что на территории заповедника за исследуемый период уменьшение биомассы хвойной растительности наступает быстрее, чем лиственной. Одной из причин уменьшения биомассы хвойных древостоев на территории России является их более интенсивная вырубка, чем лиственных (Исаев и др., 2014). Поскольку на территории заповедника запрещено любое вмешательство, данное объяснение не может быть причиной наибольшей деградации хвойных древостоев. Однако положение может усугубляться участвовавшими в последние годы катастрофическими пожарами

и усыханиями лесов (особенно пихты) под воздействием экстремальных метеорологических условий.

Основными факторами, предопределяющими многолетнюю динамику растительного покрова, являются климатические изменения, причём эти изменения могут иметь различную направленность в разных регионах. Систематические метеорологические наблюдения на территории заповедника «Столбы» Красноярского края ведутся с 1927 г. Поэтому сначала были проанализированы ряды средней температуры воздуха и суммы осадков за период май – сентябрь в течение длительного времени (1980–2016). За исследуемый период выявлен положительный тренд средней температуры воздуха и суммы осадков (рис. 3).

Это подтверждается литературными данными. За последние десятилетия (до 2003 г.) в заповеднике «Столбы» среднегодовые и среднемноголетние температуры воздуха отчётливо показывают тенденцию к увеличению (Фокина и др., 2006). Самое большое потепление за данный период зафиксировано с 1993 по 2003 г.

На основе анализа климатических данных в зимнее время в течение 1980–2016 гг. установлено, что тренд суммарного количества осадков положительный, средняя температура падает. Исследуемая территория находится в горной тайге Восточных Саян и подтайге Средне-Сибирского плоскогорья, в связи с этим снежный покров задерживается и корни не оголяются. Подавляющая часть (79,5 %) площади сосняков, лиственничников и кедровников имеют возраст 200–300 лет. Хвойное иссушение характерно для более ослабленных древостоев и относится к факторам, влияющим на деградацию леса.

Анализ изменения состояния лесной растительности на исследуемой территории по спутниковым данным проведён за период 2003–2016 гг. Поэтому для более точного исследования корреляционных зависимостей между изменениями метеорологических условий и NDVI хвойной и лиственной растительности построены многолетние ряды средней температуры воздуха и суммы осадков с 2003 по 2016 г. За данный период выявлено отсутствие значимых трендов климатических параметров (рис. 4). При этом с 2012 г. температура и сумма осадков находятся в противофазе. Анализ динамики NDVI лесной растительности и гидро-термического фактора на территории заповедника в 14-летнем цикле выявил незначительную корреляционную зависимость между этими переменными.

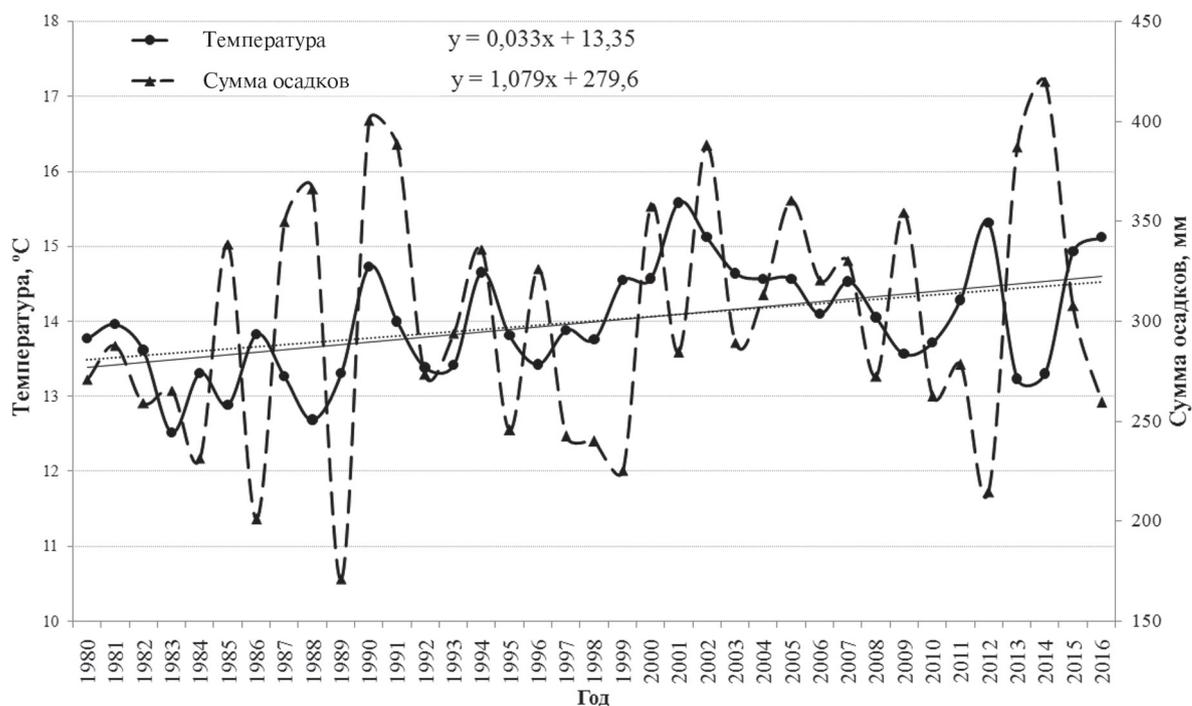


Рис. 3. Межгодовая изменчивость средних значений температуры воздуха и суммы осадков в течение периода вегетации с мая по сентябрь (1980–2016)

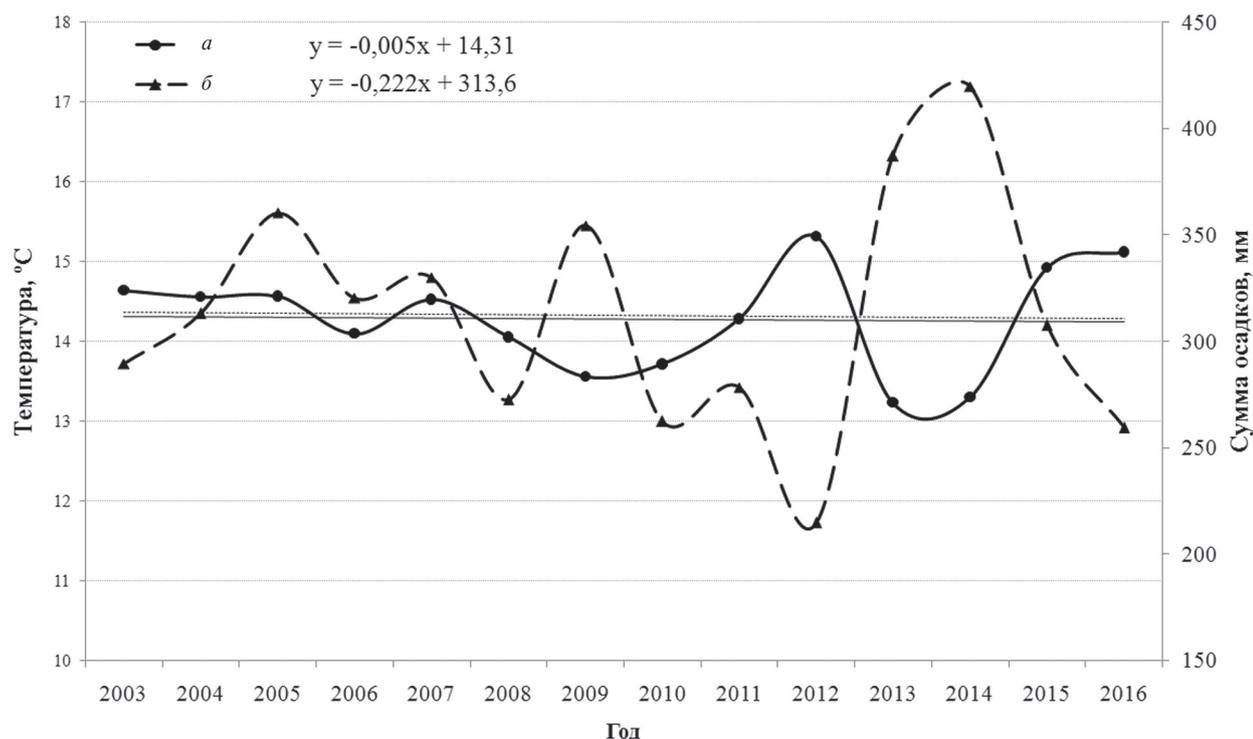


Рис. 4. Межгодовая изменчивость средних значений температуры воздуха (а) и суммы осадков (б) в течение периода вегетации с мая по сентябрь (2003–2016)

Известно, что отрицательный уклон тренда растительности указывает на деграционные процессы. Причиной этому могут быть изменения климатических факторов, влияние которых рассмотрено выше, а также антропогенное воздействие, пожары, старение и болезни лесной растительности (Пропастин, Муратова, 2006; Goetz et al., 2005).

Государственный природный заповедник «Столбы» расположен на территории, испытывающей всё увеличивающееся антропогенное воздействие, поскольку находится в непосредственной близости от Красноярска. Ведущими источниками выбросов вредных веществ являются предприятия топливно-энергетического комплекса, автотранспорт, предприятия цветной металлургии и химических производств. Негативному влиянию промышленности Красноярска в основном подвержена пригородная часть заповедника. Очаги загрязнения также наблюдаются в центральной части и на юге заповедника, что напрямую связано с рельефом местности. Наибольшая степень загрязнения соответствует возвышенностям с абсолютной отметкой выше 700 м над уровнем моря. Именно на вершинах хребтов, перевалов складывается неблагоприятная экологическая обстановка, что хорошо прослеживается по полученным картам распределения таких тяжёлых металлов, как ртуть, никель, цинк, свинец, а также фтор. Таким образом, эта территория подвержена антропогенному влиянию (Ерунова и др., 2008; Хлебопрос и др., 2012).

Известно также, что вредные химические вещества снижают прирост деревьев и их плодоношение, вызывают «усыхание» деревьев, разрушают покровные ткани листьев и хвои, тормозят фотосинтез, нарушают действие ферментов и водный режим растений. Особенно губительны поллютанты (загрязнители) для вечнозелёных пород, которые не сбрасывают на зиму листву (хвою) и вместе с ней не освобождаются от большей части поглощённых вредных веществ.

Основная зона заповедника «Столбы» — строго охраняемая, закрытая для посещения. Однако на данной территории существуют массивы старовозрастных деградирующих лесов, слабо затронутые человеческой деятельностью. Кроме того, болезни древесных пород широко распространены по всей территории России, в том числе на территории заповедника. Они играют существенную роль в динамике фитосанитарного состояния лесов. В настоящее вре-

мя гибель хвойных насаждений от болезней ежегодно составляет 2 % общей площади усохших лесов. Наиболее распространённым проявлением патологического состояния у деревьев являются изменения в кроне, которые обозначаются термином «усыхание кроны». Под этим термином понимают не только отмирание ветвей и сучьев, но и усыхание вершины, аномальную окраску хвои и листьев, а также их опадение (Овчинникова и др., 2011).

## Заключение

В настоящее время при изучении отклика растительности на крупномасштабные климатические изменения всё более широкое применение получают данные дистанционного зондирования Земли (Елсаков, Телятников, 2013; Justice et al., 2002). Оценка степени нарушенности лесных экосистем имеет существенное значение для устойчивого управления лесами и использования лесных ресурсов (Терехин, 2017). Лесные фитоценозы относятся к важнейшей составляющей биоресурсного потенциала страны (Исаев и др., 2014). Они способны аккумулировать химические вещества в больших количествах, чем другие экосистемы (Кизеев, Силкин, 2017).

В результате исследования состояния лесной растительности на территории заповедника «Столбы» Красноярского края по спутниковым данным за период 2003–2016 гг. выявлены закономерности и сделаны следующие выводы:

1. На основании отрицательных трендов усреднённых NDVI хвойных и лиственных древостоев за период май – сентябрь и максимальных NDVI выявлена тенденция ухудшения состояния лесной растительности. Причиной этому может быть совокупность факторов: изменение климата, антропогенное влияние города и наличие старовозрастного леса.
2. Анализ динамики NDVI лесной растительности и климатического фактора в 14-летнем цикле выявил незначительную корреляционную зависимость между этими переменными.
3. Уклон трендов усреднённых NDVI хвойных древостоев за период май – сентябрь и максимальных NDVI превышает уклон трендов NDVI лиственных древостоев. Это свидетельствует о более быстром уменьшении биомассы хвойной растительности, чем лиственной.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-45-243007 p\_мол\_a и государственного задания № АААА-А17-117013050027-1.

## Литература

1. *Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // *Лесоведение*. 2015. № 2. С. 83–94.
2. *Елсаков В. В., Телятников М. Ю.* Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
3. *Ерунова М. Г., Гостева А. А., Якубайлик О. Э.* Геоинформационное обеспечение задач экологического мониторинга особо охраняемых территорий // *Журн. СФУ. Техника и технологии*. 2008. Т. 1. № 4. С. 366–376.
4. *Исаев А. С., Барталев С. А., Лупян Е. А., Лукина Н. В.* Спутниковое зондирование — уникальный инструмент мониторинга лесов России // *Вестник Российской Академии Наук*. 2014. Т. 84. № 12. С. 1073–1079.
5. *Кизеев А. Н., Силкин К. Ю.* Оценка состояния лесных фитоценозов в 30-км зоне Кольской АЭС по наземным и спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 1. С. 125–135.

6. *Нейштадт И. А.* Построение безоблачных композитных спутниковых изображений MODIS для мониторинга растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 2. № 3. С. 359–365.
7. *Овчинникова Т. М., Фомина В. А., Андреева Е. Б., Должкова Н. П., Суховольский В. Г.* Анализ изменений сроков сезонных явлений у древесных растений заповедника Столбы в связи с климатическими факторами // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 28. № 1–2. С. 54–59.
8. *Пропастин П. А., Муратова Н. Р.* Анализ многолетних рядов NOAA/AVHRR/NDVI и гидрометрических условий южной части Казахского мелкосопочника // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 366–374.
9. *Саворский В. П., Захаров А. И., Захарова Л. Н., Маклаков С. М., Панова О. Ю., Чумаченко С. И.* Комплексный анализ результатов оптических и радиолокационных наблюдений лесных покровов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 213–223.
10. *Терехин Э. А.* Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 112–124.
11. *Фокина Н. В., Лигаева Н. А., Андреева Е. Б., Должковая Н. П.* Исследование климатических особенностей заповедника «Столбы» // Вестник Красноярского гос. педагогич. ун-та им. В. П. Астафьева. 2006. № 2. С. 22–27.
12. *Хлебопрос Р. Г., Тасейко О. В., Иванова Ю. Д., Михайлюта С. В.* Красноярск. Экологические очерки. Красноярск: СФУ, 2012. 128 с.
13. *Шевырнов А. П., Чернецкий М. Ю., Высоцкая Г. С.* Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края // Исследование Земли из космоса. 2012. № 6. С. 77–87.
14. *Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S.* A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. No. 9. P. 1977–1982.
15. *Chernetskiy M., Pasko I., Shevyrnogov A., Slyusar N., Khodyayev A.* A study of forest vegetation dynamics in the south of the Krasnoyarskii Krai in spring // Advances in Space Research. 2011. V. 48. No. 5. P. 819–825.
16. *Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D.* Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global Change Biology. 2009. V. 15. No. 3. P. 561–577.
17. *Goetz Sc., Bunn A. G., Fiske G. J., Houghton R. A.* Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance // Proc. National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). 2005. V. 102. No. 38. P. 13521–13525.
18. *Justice C. O., Townshend J. R. G., Vermote E. F., Masuoka E., Wolfe R. E., Saleous N., Roy D. P., Morisette J. T.* An overview of MODIS Land data processing and product status // Remote Sensing of Environment. 2002. No. 83. P. 3–15.
19. *Kowabata A., Ichi K., Yamaguchi Y.* Global Monitoring of Interannual Changes in Vegetation Activities Using NDVI and its Relationship to Temperature and Precipitation // Intern. J. Remote Sensing. 2001. No. 22. P. 1377–1382.
20. *Nightingale J. M., Phinn S. R.* Assessment of relationships between precipitation and satellite derived vegetation condition within South Australia // Australian Geographical Studies. 2003. No. 41. P. 180–195.
21. *Tucker C. J., Slayback D. A., Pinzon J. E., Los S. O., Muneni R. B., Tailor M. G.* Higher Northern Latitude Normalized Difference Vegetation Index and Growing Season Trends from 1982 to 1999 // Intern. J. Biometeorology. 2001. V. 45. No. 4. P. 184–190.
22. *Walther G. R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T. J., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F.* Ecological responses to recent climate change // Nature. 2002. No. 416. P. 389–395.
23. *Xiao J., Moody A.* Trends in vegetation activity and their climatic correlates: China 1982 to 1998 // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. No. 24. P. 5669–5689.

## Assessment of the state of forest vegetation in Krasnoyarsk Territory (Stolby Nature Reserve) according to satellite data

T. I. Pisman, I. Yu. Botvich, A. P. Shevyrnogov

*Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*  
E-mails: *tpisman@mail.ru, pech@ibp.ru, irina.pugacheva@mail.ru*

The variability of the state of forest vegetation was studied basing on the analysis of NDVI time series (2003–2016) of coniferous and deciduous stands and climate in Krasnoyarsk Territory (Stolby Nature Reserve). The initial data were 8-day Modis satellite information (MOD09Q1 product) and meteorological information from terrestrial weather stations. It was revealed that the trends of the averaged NDVI of forest vegetation for the period May – September and the maximum NDVI were negative. An analysis of the relationship between the dynamics of NDVI forest vegetation and the hydrothermal factor on the territory of the reserve in the 14-year cycle revealed an insignificant correlation between these variables. The negative NDVI trends of coniferous and deciduous stands indicate degradation processes. Deterioration of the state of forest vegetation in the study area detected by satellite data is explained by a combination of factors: climate change, anthropogenic impact of Krasnoyarsk and presence of old-aged forest.

**Keywords:** Stolby Nature Reserve, coniferous and deciduous vegetation, satellite sounding, Modis, NDVI trends, climate, anthropogenic factors

Accepted: 04.09.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-130-140

### References

1. Bartalev S. A., Styitsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite estimation of forest deaths in Russia from fires), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
2. Elsakov V. V., Telyatnikov M. Yu., Mezhdogodovye izmeneniya indeksa NDVI na territorii evropeyskogo severo-vostoka Rossii i zapadnoi Sibiri v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsii poslednikh desyatiletii (Effects of interannual climatic fluctuations of the last decade on NDVI in north-eastern European Russia and Western Siberia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 260–271.
3. Erunova M. G., Gosteva A. A., Yakubaylik O. E., Geoinformatsionnoe obespechenie zadach ekologicheskogo monitoringa osobo okhranyaemykh territorii (GIS Support for Ecological Monitoring of Natural Reserved Territories), *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii*, 2008, Vol. 1, No. 4, pp. 366–376.
4. Isaev A. S., Bartalev S. A., Loupian E. A., Lukina N. V., Sputnikovoe zondirovanie Zemli — unikalnyi instrument monitoringa lesov Rossii (Satellite earth sensing — unique instrument for monitoring forest Russia), *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2014, Vol. 84, No. 12, pp. 1073–1079.
5. Kizeev A. N., Silkin K. Yu., Otsenka sostoyaniya lesnykh fitotsenozov v 30-km zone Kolskoi AES po nazemnym i sputnikovym dannym (State estimation of forest phytocenosis in the 30-km zone of the Kola NPP from ground and satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 125–135.
6. Neyshtadt I. A., Postroenie bezoblachnykh kompozitnykh sputnikovyykh izobrazhenii MODIS dlya monitoringa rastitelnosti (Construction of cloudless composite satellite images MODIS for monitoring vegetation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 2, No. 3, pp. 359–365.
7. Ovchinnikova T. M., Fomina V. A., Andreeva E. B., Dolzhkova N. P., Suhovolskiy V. G., Analiz izmenenii srokov sezonnykh yavlenii u drevesnykh rastenii zapovednika Stolby v svyazi s klimaticheskimi faktorami (Analysis of changes of seasonal time seasons of tree plants in connection with climate factors), *Khvoynye borealnoi zony*, 2011, Vol. 28, No. 1–2, pp. 54–59.
8. Propastin P. A., Muratova N. P., Analiz mnogoletnykh ryadov NOAA/AVHRR/NDVI i gidrometricheskikh uslovii yuzhnoi chasti Kazakhskogo melkosopochnika (Analysis of long-term series NOAA/AVHRR/NDVI and hydrometric conditions of the southern part of the Kazakh melkosopochnika), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 366–374.

9. Savorskiy V. P., Zakharov A. I., Zakharova L. N., Maklakov S. M., Panova O. Yu., Chumachenko S. I., Kompleksnyi analiz rezultatov opticheskikh i radiolokatsionnykh nablyudenii lesnykh pokrovov (Complex analysis of results of optical/radar forest observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 213–223.
10. Terekhin E. A., Otsenka narushennosti lesnykh ekosistem yugo-zapada Srednerusskoi vozvyshechnosti s primeneniem materialov kosmicheskikh s"emok (Estimation of forest ecosystems disturbance in the southwest of Central Russian Upland using remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 112–124.
11. Fokina N. V., Ligaeva N. A., Andreeva E. B., Dolzhkovaya N. P., Issledovanie klimaticheskikh osobennosti zapovednika "Stolby" (Study of climatic features of the Stolby reserve), *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V. P. Astafeva*, 2006, No. 2, pp. 22–27.
12. Khlebopros R. G., Taseyko O. V., Ivanova Yu. D., Mikhailyuta S. V., *Krasnoyarsk. Ekologicheskie ocherki* (Krasnoyarsk. Ecological essays), Krasnoyarsk: SFU, 2012, 128 p.
13. Shevyrnogov A. P., Chernetskiy M. Yu., Vysotskaya G. S., Mnogoletnie trendy NDVI i temperatury na yuge Krasnoyarskogo kraia (Interannual Trend of NDVI and Temperature in the South of Krasnoyarsky Krai), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 6, pp. 77–87.
14. Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S., A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, pp. 1977–1982.
15. Chernetskiy M., Pasko I., Shevyrnogov A., Slyusar N., Khodyayev A., A study of forest vegetation dynamics in the south of the Krasnoyarskii Krai in spring, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 48, pp. 819–825.
16. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Riano D., Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices, *Global Change Biology*, 2009, Vol. 15, pp. 561–577.
17. Goetz Sc., Bunn A. G., Fiske G. J., Houghton R. A., Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2005, Vol. 102, pp. 13521–13525.
18. Justice C. O., Townshend J. R. G., Vermote E. F., Masuoka E., Wolfe R. E., Saleous N., Roy D. P., Morisette J. T., An overview of MODIS Land data processing and product status, *Remote Sensing of Environment*, 2002, No. 83, pp. 3–15.
19. Kowabata A., Ichi K., Yamaguchi Y., Global Monitoring of Interannual Changes in Vegetation Activities Using NDVI and its Relationship to Temperature and Precipitation, *Intern. J. Remote Sensing*, 2001, No. 22, pp. 1377–1382.
20. Nightingale J. M., Phinn S. R., Assessment of relationships between precipitation and satellite derived vegetation condition within South Australia, *Australian Geographical Studies*, 2003, No. 41, pp. 180–195.
21. Tucker C. J., Slayback D. A., Pinzon J. E., Los S. O., Muneni R. B., Tailor M. G., Higher Northern Latitude Normalized Difference Vegetation Index and Growing Season Trends from 1982 to 1999, *Intern. J. Biometeorology*, 2001, Vol. 45, pp. 184–190.
22. Walther G. R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T. J., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F., Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 2002, No. 416, pp. 389–395.
23. Xiao J., Moody A., Trends in vegetation activity and their climatic correlates: China 1982 to 1998, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, pp. 5669–5689.