

Материалы спутникового мониторинга в анализе сомкнутости лесных фитоценозов приполярного Урала

И.О. Марущак, В.В. Елсаков

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН
167610 Сыктывкар, Коммунистическая, 28
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

В работе представлены результаты, демонстрирующие основные направления изменения сомкнутости крон предгорных и горных лесов Приполярного Урала за 18-ти летний временной период (1988-2006гг) по материалам анализа спутниковых изображений Landsat. Привлечение серии зимних изображений периода 1988-2006 гг и метода декомпозиции спектральных смесей позволило установить изменения показателя сомкнутости крон ненарушенных фитоценозов в среднем до 1-2 % в год на участках, ранее сформированных листовичников и редколесий экотонной зоны вблизи границы лес-тундра. Наиболее стабильные характеристики отмечены для класса темнохвойных лесов.

Ключевые слова: экосистемы Приполярного Урала, сомкнутость крон, дистанционный мониторинг

Введение

Становление представлений о формировании растительного покрова отдельных территорий в виде гетерогенных популяционных мозаик видов – эдификаторов [1], подвергнувшихся влиянию эндогенных и экзогенных факторов, диктует необходимость более пристального исследования и анализа показателей и причин временных изменений фитоценозов. В этом ключе все чаще привлекаются данные дистанционного зондирования (ДДЗ) разных лет, диапазонов и пространственного разрешения с составлением их временных серий [2]. В последние годы возросло внимание исследователей, направленное на изучение изменений растительного покрова, наблюдаемых в пределах границ экотонных зон, отражающих общую направленность процессов трансформации природных экосистем под влиянием региональных или глобальных факторов. Границы лесных фитоценозов, ряд показателей древостоев рассматриваются авторами в качестве возможных параметров для исследования изменений биоценозов под влиянием глобальных процессов. Так, особый интерес вызывают исследования предгорных и горных лесов [3,4], в связи с более яркой выраженностью градиента эколого-ценотических условий, приводящей к зональным сменам растительности на более компактной по площади территории, чем на равнинной части. Основные тенденции изменения лесных фитоценозов на верхней границе леса предгорных и горных участков прослеживаются в продвижении границы леса и увеличении сомкнутости крон залесенных участков [3,4], усилении радиального прироста древесины [5], что связывается с климатическими сдвигами.

В качестве наиболее важного показателя, используемого для выявления временных изменений лесных фитоценозов, используется характеристика сомкнутости древостоев.

Предварительный анализ данных показал, что достоверность выявления показателей сомкнутости возрастает при использовании зимних изображений, что с одной стороны связано с маскированием многих форм микрорельефа земной поверхности снежным покровом [6], с другой – отсутствием листвы и погребением лишайниково-мохового, травяно-кустарничкового и частично кустарникового яруса, что приводит к большей контрастности исследуемых компонент.

Цель настоящей работы состояла в исследовании особенностей распределения и выявлении изменений показателя сомкнутости крон лесных фитоценозов предгорной и горной территории Приполярного Урала басс. р. Кожим с использованием разногодных материалов дистанционного зондирования высокого разрешения (*Landsat TM 4,5*). Горные леса Республики Коми занимают площадь около 2.4 млн. га – 6% всего лесного фонда [7], большинство из них сохранило свои природные особенности и включено в 1995 г. в перечень объектов всемирного наследия природы ЮНЕСКО. Большинство наблюдаемых изменений растительного покрова территории приходится на период разведки и освоения минеральных ресурсов территории, связано с после пожарным восстановлением фитоценозов [8].

Распределение и характеристики лесных фитоценозов территории исследований во многом зависят от их приуроченности к геоморфологическим элементам, комбинирования почвенных, микроклиматических условий, ландшафтной приуроченности и склоновой ориентации исследуемых участков [9].

Материалы и методы

Предобработку материалов спутниковых изображений высокого разрешения *Landsat* провели общепринятыми методами, включая пространственную, радиометрическую и топокоррекцию [10-15]. Выделение основных классов растительного покрова, для анализа особенностей их пространственной приуроченности, проводили по изображению *Landsat TM 5*, полученное для 17.07.2001, методами поэтапной управляемой классификации [16]. Для калибровки данных, выделения эталонных участков и проверки результатов выполнены серии полевых выездов (7-10 апреля, 28 июня-11 июля 16-22 августа 2009 гг.), материалам лесоустройства (1998 г.) Кожимского и Верхнекожимского лесничеств. Для учета сомкнутости крон древесного и кустарникового ярусов проведено сравнение результатов тематической обработки изображений высокого разрешения (30 м) *Landsat 5*, второй половины зимнего периода наблюдений за период 1988 – 2006 гг (Таблица 1). Высота снежного покрова в данный период времени максимальна и варьирует в пределах 120-140 см.

При обработке изображений использовали принципы декомпозиции спектральных смесей (метод SMA) исходя из положения, что доля компонент при этом принимается

пропорционально их площади в проекции на земную поверхность [17]. 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 выражения:

$$DN_c = \sum_{i=1}^n F_i * DN_{i,c} + E_c \quad (1)$$

учитывая следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad 0 \leq F_i \leq 1 \quad (2)$$

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 .

Таблица 1. Характеристика используемых изображений

Параметры сцены	Дата съемки	Время съемки (GMT)	Высота солнца	Азимут солнца
L5 168_14	8.4.1988	06:50	30.5	159.9
L7 168_14	9.4.2000	07:16	31.6	167.3
L7 168_14	30.3.2002	07:13	27.5	165.9
L5 167_14	4.10.2006	07:12	19.9	172.3

Абсолютное доминирование в формировании значений «древесной» компоненты на модельных участках относится к ели европейской и лиственнице сибирской, в качестве примеси отмечены береза извилистая, ольховник кустарниковый, древовидные виды ив. Расчет значений компоненты «сомкнутости древостоев» для пикселов изображения по крайним элементам значений (0-100%) выполнено с использованием возможностей программного пакета ENVI 4.6.1.

Итогом обработки изображений 1988-2006 гг. стали тематические картосхемы, отражающие показатель сомкнутости древесного яруса (%) для отдельных лет наблюдений. Результаты обработки легли в основу расчета интенсивности изменения показателя по 4 изображениям (1988-2006), представленного в виде линейной функции и приведенного для удобства к 10-ти летнему интервалу наблюдений.

Результаты работы и их обсуждение

В ходе выполнения классификации выделено 18 классов земной поверхности, из них 14 включают разные типы растительного покрова. Доминирующие лесные фитоценозы, включающие в себя древесные породы – ель европейскую (*Picea obovata*) и лиственницу сибирскую (*Larix sibirica*), в качестве примеси отмечены береза пушистая, извилистая (*Betula pubescens*, *B. tortuosa*) (Таблица 2).

Таблица 2. Характеристика доминирующих классов лесных фитоценозов территории горной части басс. р. Кожим*

Характеристика	Обозначение	СК,%	S, %
Темнохвойные леса Долинные темнохвойные леса выположенных склонов на суглинистых почвах с доминированием <i>Picea obovata</i> , с примесью лиственных: <i>Betula pubescens</i> , <i>B. tortuosa</i> , травяно-зеленомошные, кустарничково-травяно-зеленомошные. В травяном покрове преобладают: <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Vaccinium myrtillus</i> L. <i>Empetrum hermaphroditum</i> (Lange) Hagerup, <i>Linnaea borealis</i> L., <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drey., <i>Trientalis europaea</i> L., <i>Rubus arcticus</i> L. В хорошо развитом травянистом ярусе также присутствуют: <i>Geranium albiflorum</i> Ledeb., <i>Veratrum lobelianum</i> Bernh., <i>Solidago virgaurea</i> L., <i>Cirsium heterophyllum</i> (L.) Hill, <i>Viola biflora</i> L. и многие другие виды. Моховой покров представлен преимущественно <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i> , <i>Polytrichum</i> .	T1	70-90	6.5
Светлохвойные леса			93.5
Смешанные лиственничные леса с примесью <i>Picea obovata</i> (СК) преимущественно ерниково-зеленомошные. Травяно-кустарничковый ярус беден видовым составом, преобладают <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L. присутствуют <i>Bistorta major</i> S.F.Gray, <i>Pedicularis lapponica</i> L. В моховом покрове преобладают <i>Pleurozium schreberi</i> , виды родов <i>Sphagnum</i> , <i>Polytrichum</i> . Примесь кустистых лишайников (<i>Cladonia</i> , также <i>Nephroma arctica</i>).	C1	60-70	28.6
Лиственничные ерниково-зеленомошные леса пологих склонов и речных долин с близким залеганием скальных пород. В травяно-кустарничковом ярусе преобладают: <i>Betula nana</i> L., <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Vaccinium myrtillus</i> L. <i>Empetrum hermaphroditum</i> (Lange) Hagerup Редки травянистые растения: <i>Bistorta major</i> S.F.Gray, <i>Luzula multiflora</i> (Ehrh.) Lej., <i>Rubus arcticus</i> L., <i>Trientalis europaea</i> L., <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drey. Моховой покров сложен в основном из <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i>	C2	40-60	24.5
Редколесья и редины из <i>Larix sibirica</i> на участках подгольцового пояса. Хорошо развит кустарничковый ярус: <i>Betula nana</i> L., <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Vaccinium myrtillus</i> L. <i>Empetrum hermaphroditum</i> (Lange) Hagerup, <i>Phyllodoce caerulea</i> (L.) Bab., <i>Linnaea borealis</i> L. Из травянистых растений присутствуют <i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drey., <i>Trientalis europaea</i> L., <i>Solidago virgaurea</i> L., <i>Diphysastrum alpinum</i> (L.) Holub. Моховой покров сложен в основном из <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i> , <i>Polytrichum</i> , <i>Dicranum</i> . Единичны лишайники: <i>Cladonia</i> , <i>Stereocaulon</i> .	C3	<30	40.3

* - в таблице представлены показатели сомкнутости крон (СК, %), соотношение площадей лесных фитоценозов (S, %).

Анализ распределения выделенных классов лесной растительности и редколесий показал, что на рассмотренной территории наиболее представлены классы редколесий и

редин (40.3%) из *Larix sibirica* (C3), приуроченные преимущественно к верхним границам леса и участкам с близким залеганием скальных пород. Лесные фитоценозы террас высокого уровня часто окаймлены двумя экотонными зонами и переходят в тундровые классы растительности через редколесья. Менее представлены в пределах территории смешанные лиственничные леса с примесью *Picea obovata* (C1) (28.6%) и лиственничные ерниково-зеленомошные леса (24.5%) (C2). На долю долинных темнохвойных лесов (Т1), приуроченных к пойменным участкам и пологим склонам приходится всего 6.5%.

Использование SMA-анализа разногодных зимних изображений позволило оценить показатель сомкнутости крон и его изменение для выделенных лесных фитоценозов на модельном участке. Половина лесных фитоценозов территории представлена сообществами с сомкнутостью крон 50-70% (25.1%) и 30-50% (24.2%) (таблица 3). Наибольшая сомкнутость древостоев отмечена в пределах террасы высокого уровня (эрозийная, цокольная). Ее повышение и переход в подошву горных склонов сопровождается переходом в разреженные лиственничники и редколесья. Порядка 33% имеет сомкнутость ниже 30%.

Таблица 3. Распределение классов сомкнутости крон для выделенных групп лесных фитоценозов по 2002 г (числитель) и изменение относительных площадей выделенных групп между изображениями 1988-2002 гг (%)*

Классы сомкнутости (%)	Классы лесных фитоценозов				ВСЕГО:
	T1	C1	C2	C3	
<10		0,1	0,5	8,7	9,3
	-	-0,1	-0,8	-3,4	-4,3
10-30	-	0,6	4,0	19,1	23,7
		-0,7	-4,5	1,2	-3,9
30-50	0,1	3,0	11,1	9,9	24,2
	-0,1	-3,0	1,2	4,0	2,1
50-70	0,9	13,9	8,1	2,2	25,1
	-0,5	-0,2	3,4	0,6	3,3
70-90	4,7	11,0	0,8	0,3	16,9
	0,6	2,9	0,0	-0,1	3,3
>90	0,7	0,1	-	-	0,9
	-0,2	-0,3			-0,5
ВСЕГО:	6,5	28,6	24,5	40,3	100,0
	-0,3	-1,3	-0,6	2,2	0

*- положительные значения увеличение, отрицательные уменьшение площадей

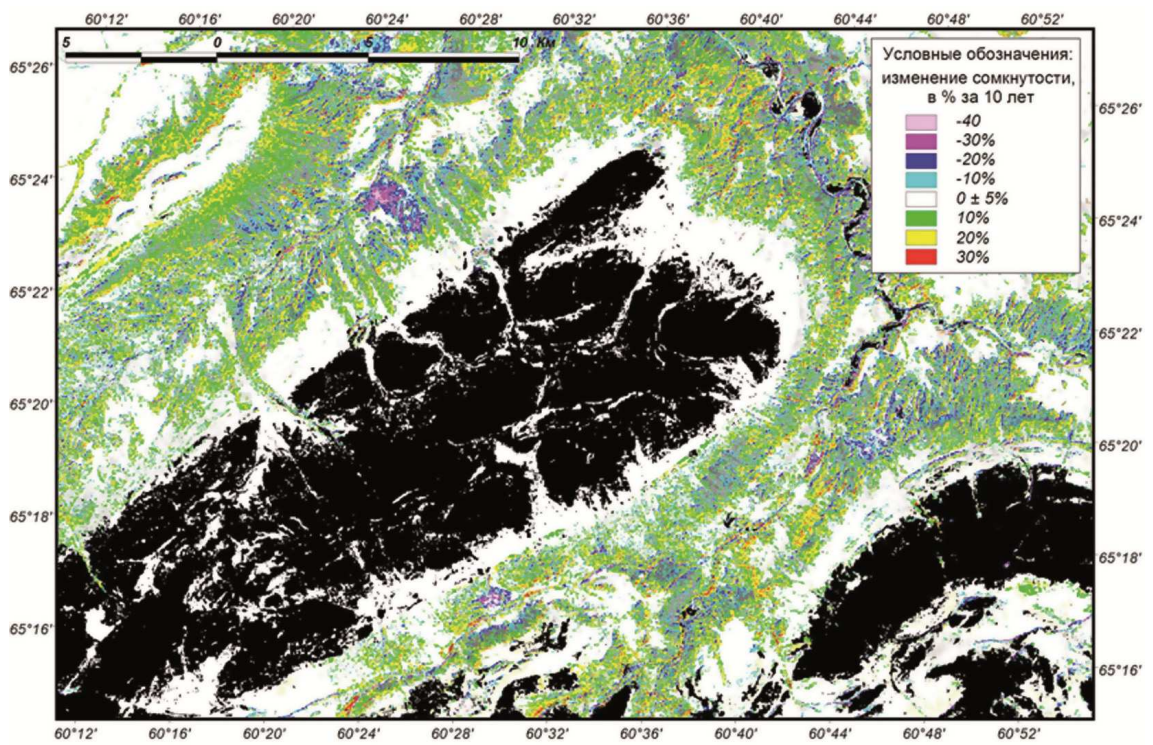


Рис. 1. Изменение сомкнутости лесных фитоценозов, в % сомкнутости за 10 лет.
Маска гор представлена черным цветом

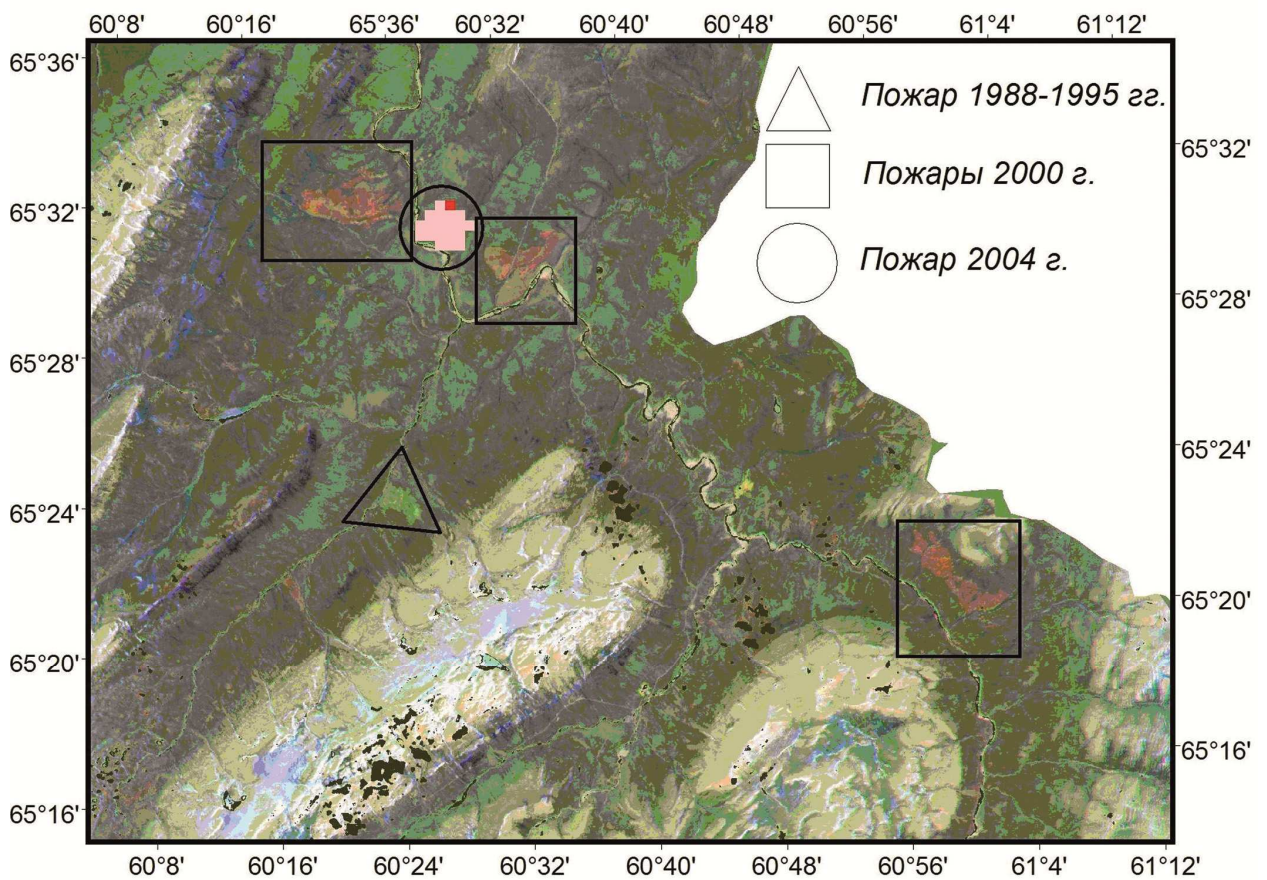


Рис. 2. Пожары на территории басс.р.Кажим за период 1988-2008 гг.

Для отдельных участков территории наблюдали как рост, так и снижение величин показателя или его стабильность (рис.1). В месте с тем, можно отметить, что рост степени сомкнутости крон также выделяет участки, ранее подвергнувшиеся катастрофическим влияниям. Активное зарастание лиственными породами нарушенных участков отмечено на гарях Национального парка. В качестве интенсивности их изменений служит показатель сомкнутости, меняющийся за 10 лет до +/- 20%. Полученные результаты позволяют оценить масштабность и пространственную приуроченность эндогенных и экзогенных влияний, ведущих к росту степени гетерогенности растительного покрова, оценить их интенсивность. Постпожарное восстановление нарушенных участков в пределах парка представлено на достаточно больших площадях. Так, за период 1995-2008 гг. на территории басс. р. Кожим (Национальный парк «Югыд ва») выявлено 5 крупных очагов возгорания: 1 - 1988-1995, 3 в 2000 г. и 1 – в 2004 г. Использование временных серий спутников среднего и низкого разрешения с привлечением, автоматизированных алгоритмов обработки [18], позволяет установить даты возгорания и сроки прохождения огнем территории (рис.2). Так, 29 июля – 8 августа 2000 г. по данным временных серий SPOT-Vegetation S10 произошло возгорание 3-х разобщенных участков, их затухание 18-27 августа. В 2004 г. пожар по данным Terra/Aqua-MODIS пришлось на 27.07 - 16.08.

Работа выполнена в рамках проектов Президиума и отделений РАН: «Биологическое разнообразие наземных и водных экосистем Приполярного Урала: механизмы формирования, современное состояние, прогноз естественной и антропогенной динамики».

Литература:

1. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность: 2 кн. // ЦЭПЛ. – М.: Наука, 2004. 478 с.
2. *Ranson K.J., Sun G., Kharuk V.I., Kovacs K.* Assessing tundra-taiga boundary with multi-sensor satellite data // *Remote Sensing of Environment*. №93 2004. Pp.283-295.
3. *Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В.* Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // *Экология*. 2005. №2. с.83-90.
4. *Шиятов С.Г.* Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата // Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
5. *Ойдунаа О.Ч., Ваганов Е.А., Наурызбаев М.М.* Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране // *Лесоведение*. 2004. №6. С. 14-24.

6. *Алексеевко Н.А., Святкова Т.Г.* Зимние топографические карты // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5., География, 2008. №3 С.8-11.
7. Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми // М.: Дизайн. Информация картография, 2000. 260 с.
8. Биоразнообразие водных и наземных экосистем бассейна р. Кожим (северная часть национального парка “Югыд ва”). – Сыктывкар, 2010. – 128-136с.
9. *Непомилуева Н.И., Пахучий В.В., Симонов Г.А.* Древесная растительность горных долин Приполярного Урала // География и природные ресурсы. №4, 1986. С.73.
10. *Teillet P. M, Guindon B., Goodeonugh D. G.* On the slope-aspect correction of multispectral scanner data // Can. J. Remote Sens. - 1982. -Vol. - 8,Р. - 84–106.
11. *Nichol J., Law Kin Hang, Wong Man Sing.* Empirical correction of low Sun angle images in steeply sloping terrain: a slope-matching technique// International Journal of Remote Sensing. - 2006. - Vol. 27. - No. 3. P. 629–635.
12. *Twele A., Kappas M., Lauer J.* The effect of stratified topographic correction on land cover classification in tropical mountainous regions// ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes", Enschede, the Netherlands. - 2006. - P. 8-11.
13. *Civco, D. L.* Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. - 1989. - 55(9). -P. 1303-1309.
14. *Law K.H., Nichol J.* Topographic correction for differential illumination effects on ikonos satellite imagery. URL: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/347.pdf>.
15. *Colby J. D.* Topographic normalization in rugged terrain // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. - 1991. - 57. - P. 531-537.
16. *Елсаков В.В., Марущак И.О., Щанов В.М.* Картирование растительного покрова бассейна р.Кожим (Приполярный Урал) с использованием материалов дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ООО «Азбука-2000», 2009. Вып. 6. Т.2. С. 360-363.
17. *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. М.: ООО «Азбука-2000», 2009. Вып. 6. Т.2. С. 343-352.
18. *Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Уваров И.А.* Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений. // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, МИИГАиК, Главный редактор: д.т.н. Савиных В.П., Вып.2., Москва, 2006, - С. 98-109.

The remote sensing method in monitoring of forest density of mountain part of subpolar ural

Marushak I.O., Elsakov V.V.

*Institute of biology Komi SC UrD RAS
167610, Syktyvkar, Kommunisticheskaja 28.
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

The results of remote sensing monitoring of tree density in Subpolar Ural are presented per period of 18 years (1988-2006). The SMA-method of winter images was a basis for calculation of changes. The forest density was more stable in plain part of area. The main natural trends of forest density were related with increasing of crown density in ecoton zone with rare Larix is near 1-2% per year on gently sloping mountains slopes.

Key words: ecosystems of Subpolar Ural, trees density, remote sensing