

УДК 574.4

ТРЕНДЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ЗАПАДНЫХ СКЛОНОВ ПРИПОЛЯРНОГО УРАЛА

© 2010 В.В. Елсаков, И.О. Марущак

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

Поступила в редакцию 04.05.2010

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 лиственничников и редколесий экотонной зоны вблизи границы лесотундра. Наиболее стабильные характеристики отмечены для класса темнохвойных лесов.

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

Климатические флуктуации выступают в качестве основных крупномасштабных причин, изменяющих характеристики растительного покрова. Даже недолговременные климатические вариации напрямую влияют на продуктивность экосистем и динамику растительного покрова. Развитие системы дистанционного мониторинга, средств системного анализа данных и привлечение архивных метеорологических данных позволяет проводить анализ трендов изменения свойств растительного покрова для крупных территориальных единиц: Гренландии [1], Кольского полуострова [2], Феноскандии [3]. 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 их влиянием. Так, особый интерес вызывают исследования предгорных и горных лесов [4, 5], 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 [4, 5], усилении радиального прироста древесины [6], 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 [7], с другой – отсутствием листвы и погребением лишайниково-мохового, травяно-кустарничкового и частично кустарничкового 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 бассейна 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 [8], 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 послепожарным восстановлением фитоценозов [9]. 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 [10].

Елсаков Владимир Валериевич, кандидат биологических наук, старший научный сотру́бник. E-mail: Elsakov@ib.komisc.ru
Марущак Игорь Олегович, аспирант

Материалы и методы. Предобработку материалов спутниковых изображений высокого разрешения *Landsat* провели общепринятыми методами, включая пространственную, радиометрическую и топо- коррекцию [11-16]. 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 [17]. 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 TM5*, второй половины зимнего периода наблюдений за период 1988-2006 гг. 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, *Spectral Mixed Analysis*) исходя из положения, что доля компонент при этом принимается пропорционально их площади в проекции на земную поверхность [18]. 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, $DN_{i,c}$ – числовое выражение значений i -го эталона в смеси в канале c , n – количество эталонов, E_c – ошибка оценки для канала c .

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 пикселей 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 приходится на 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, б.извилистая (*Betula pubescens*, *B.tortuosa*) (табл. 1). 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 (T1), приуроченных к пойменным участкам и пологим склонам приходится всего 6,5%.

Использование SMA-анализа разногодовых 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%) (табл. 2). Наибольшая сомкнутость древостоев отмечена в пределах террасы высокого уровня (эрозионная, цокольная). Ее повышение и переход в подошву горных склонов сопровождается переходом в разреженные лиственничники и редколесья. Порядка 33% имеет сомкнутость ниже 30%.

Таблица 1. Характеристика доминирующих классов лесных фитоценозов территории горной части бассейна р. Кожим*.

Характеристика	Обо- значе- ние	СК, %	S, %
<u>Темнохвойные леса</u> Т1. 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
<u>Светлохвойные леса</u> Смешанные лиственничные леса с примесью <i>Picea obovata</i> (СК) преимущественно ерничково-зеленомошные. Травяно-кустарничково-ый 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 ерничково-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

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

Учет изменений параметров сомкнутости древостоев по 4 изображениям позволил с одной стороны снизить уровень погрешности измерений, с другой наблюдать основные тренды изменений под влиянием естественных, катастрофических (пожары) причин и антропогенного влияния. Для большинства элементов изображений (пикселей) все многообразие изменений может быть сведено к 3 видам: 1 – постепенный рост показателя сомкнутости, отмечен для ненарушенных фитоценозов, представленных преимущественно лиственничниками классов C2 и C3 или восстанавливающихся после пожара сообществ; 2 – стабильность или незначительное снижение показателя – преимущественно классы T1, C1; 3 – резкий рост/падение значения

показателя для одного из лет изображений, что связано преимущественно с пожарами (рис. 1).

Представление полученных результатов в виде функции, демонстрирующей изменение показателя сомкнутости за 10-летний временной период, показал, что для отдельных участков территории также наблюдается как рост, так и снижение величин показателя или его стабильность (рис. 2). Наибольшие изменения связаны с переходом групп менее сомкнутых лиственничников в группы более высоких классов сомкнутости (табл. 2). При этом наблюдается уменьшение количества пикселей для классов меньшей сомкнутости. Для фитоценозов класса темнохвойных лесов изменения имели наименьшую представленность.

Анализ соотношения контуров редколесий на изображениях разных лет показал, что значительного увеличения их распространения не отмечено, что с одной стороны является ограничением используемого метода (использование изображений данного пространственного разрешения позволяет определить границы леса, а не границы древесной растительности), с другой – распространение древесной растительности во многом ограничено крутизной склонов, определяющей мощность почвенного покрова [19] и выход на поверхность каменных осыпей и гольцов, заболачиванием верхних участков.

Таблица 2. 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	-	-	-	<u>8,7</u> -3,4	<u>9,3</u> -4,3
10-30	-	<u>0,6</u> -0,7	<u>4,0</u> -4,5	<u>19,1</u> <u>1,2</u>	<u>23,7</u> -3,9
30-50	-	<u>3,0</u> -3,0	<u>11,1</u> <u>1,2</u>	<u>9,9</u> <u>4,0</u>	<u>24,2</u> <u>2,1</u>
50-70	<u>0,9</u> -0,5	<u>13,9</u> -0,2	<u>8,1</u> <u>3,4</u>	<u>2,2</u> 0,6	<u>25,1</u> <u>3,3</u>
70-90	<u>4,7</u> 0,6	<u>11,0</u> <u>2,9</u>	<u>0,8</u> 0,0	-	<u>16,9</u> <u>3,3</u>
>90	<u>0,7</u> -0,2	<u>0,1</u> -0,3	-	-	<u>0,9</u> -0,5
ВСЕГО:	<u>6,5</u> -0,3	<u>28,6</u> -1,3	<u>24,5</u> -0,6	<u>40,3</u> <u>2,2</u>	<u>100,0</u> 0

*- положительные значения увеличение, отрицательные уменьшение площадей

Вместе с тем, можно отметить, что рост степени сомкнутости крон также выделяет участки, ранее подвергнувшиеся катастрофическим влияниям. Активное зарастание листовыми 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 бассейна 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 [20], позволяет установить даты возгорания и сроки прохождения огнем территории. Так, 29 июля – 8 августа 2000 г. по данным временных серий SPOT-Vegetation S10 произошло возгорание 3-х разобренных 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» (рук. С.В. Дегтева).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Karlsen, S.R.* A method using indicator plants to map local climatic variation in the Kanger-lussuaq / Scoresby Sund area, East Greenland / *S.R. Karlsen, A. Elvebakk* // Journal of Biogeography. – 2003. – №30. – P. 1469-1491.
2. *Shutova, E.* Growing seasons of Nordic mountain birch in northernmost Europe as indicated by long-term field studies and analyses of satellite images / *E. Shutova et al.* // Int. J. Biometeorol. – 2006. – №51. – P. 155-166.
3. *Karlsen, S.R.* Satellite-based mapping of the growing season and bioclimatic zones in Fennoscandia / *S.R. Karlsen, A. Elvebakk, K.A. Hogda, B. Johansen* // Global Ecology and Biogeography. – 2006. – №15. – P. 416-430.
4. *Шиятов, С.Г.* Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале / *С.Г. Шиятов, М.М. Терентьев, В.В. Фомин* // Экология. – 2005. – №2. – С. 83-90.
5. *Шиятов, С.Г.* Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата // Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 216 с.
6. *Ойдунаа, О.Ч.* Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране / *О.Ч. Ойдунаа, Е.А. Ваганов, М.М. Наурзбаев* // Лесоведение. – 2004. – №6. – С. 14-24.
7. *Алексеев, Н.А.* Зимние топографические карты / *Н.А. Алексеев, Т.Г. Сваткова* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5., География. – 2008. – №3. – С. 8-11.
8. Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми // М.: Дизайн. Информация картография, 2000. – 260 с.
9. Биоразнообразие водных и наземных экосистем бассейна р. Кожим (северная часть национального парка «Югыд ва»). – Сыктывкар, 2010. – С. 128-136.
10. *Непомилуева, Н.И.* Древесная растительность горных долин Приполярного Урала / *Н.И. Непомилуева, В.В. Пахучий, Г.А. Симонов* // География и природные ресурсы. – 1986. – №4. – С. 73.
11. *Teillet, P.M.* On the slope-aspect correction of multispectral scanner data / *P.M. Teillet, B. Guindon, D.G. Goodeonugh* // Can. J. Remote Sens. – 1982. – Vol. 8. – P. 84-106.

12. *Nichol, J.* Empirical correction of low Sun angle images in steeply sloping terrain: a slope-matching technique / *J. Nichol, Law Kin Hang, Wong Man Sing* // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27, No. 3. – P. 629-635.
13. *Twele, A.* The effect of stratified topographic correction on land cover classification in tropical mountainous regions / *A. Twele, M. Kappas, J. Lauer* // ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes", Enschede, the Netherlands. – 2006. – P. 8-11.
14. *Civco, D.L.* Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1989. – V. 55(9). – P. 1303-1309.
15. *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>.
16. *Colby, J.D.* Topographic normalization in rugged terrain // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1991. – V. 57. – P. 531-537.
17. *Елсаков, В.В.* Картирование растительного покрова бассейна р. Кожим (Приполярный Урал) с использованием материалов дистанционного зондирования / *В.В. Елсаков, И.О. Марущак, В.М. Щанов* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ООО «Азбука-2000», 2009. – Т. 2, вып. 6. – С. 360-363.
18. *Барталев, С.А.* Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок / *С.А. Барталев, Т.С. Ховратович, В.В. Елсаков* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ООО «Азбука-2000», 2009. Т.2, вып. 6. – С. 343-352.
19. *Синицин, С.Г.* Гонимые леса / *С.Г. Синицин, А.С. Агеенко, В.З. Гулисашвили* и др. – М.: Лесн. Пром-сть, 1979. – 200 с.
20. *Егоров, В.А.* Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений / *В.А. Егоров, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Уваров* // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, МИИГАиК, Гл. ред.: д.т.н. Савиных В.П., вып.2. – М., 2006. – С. 98-109.

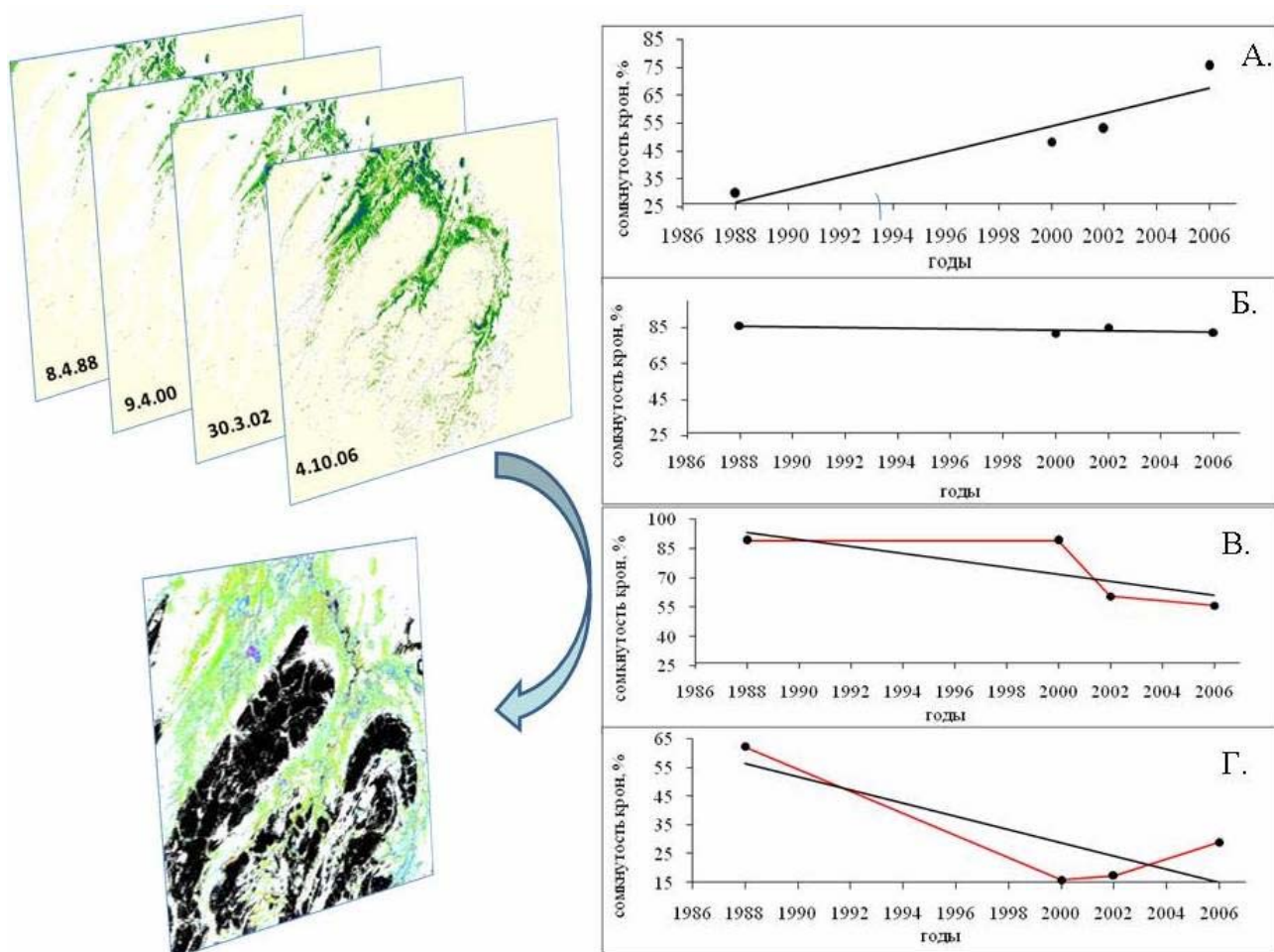


Рис. 1. Пример расчета и возможные комбинации: А – лиственное редколесье и редины; Б – долинные темнохвойные леса, В – гарь 2000 г., Г – гарь после 1988 г.

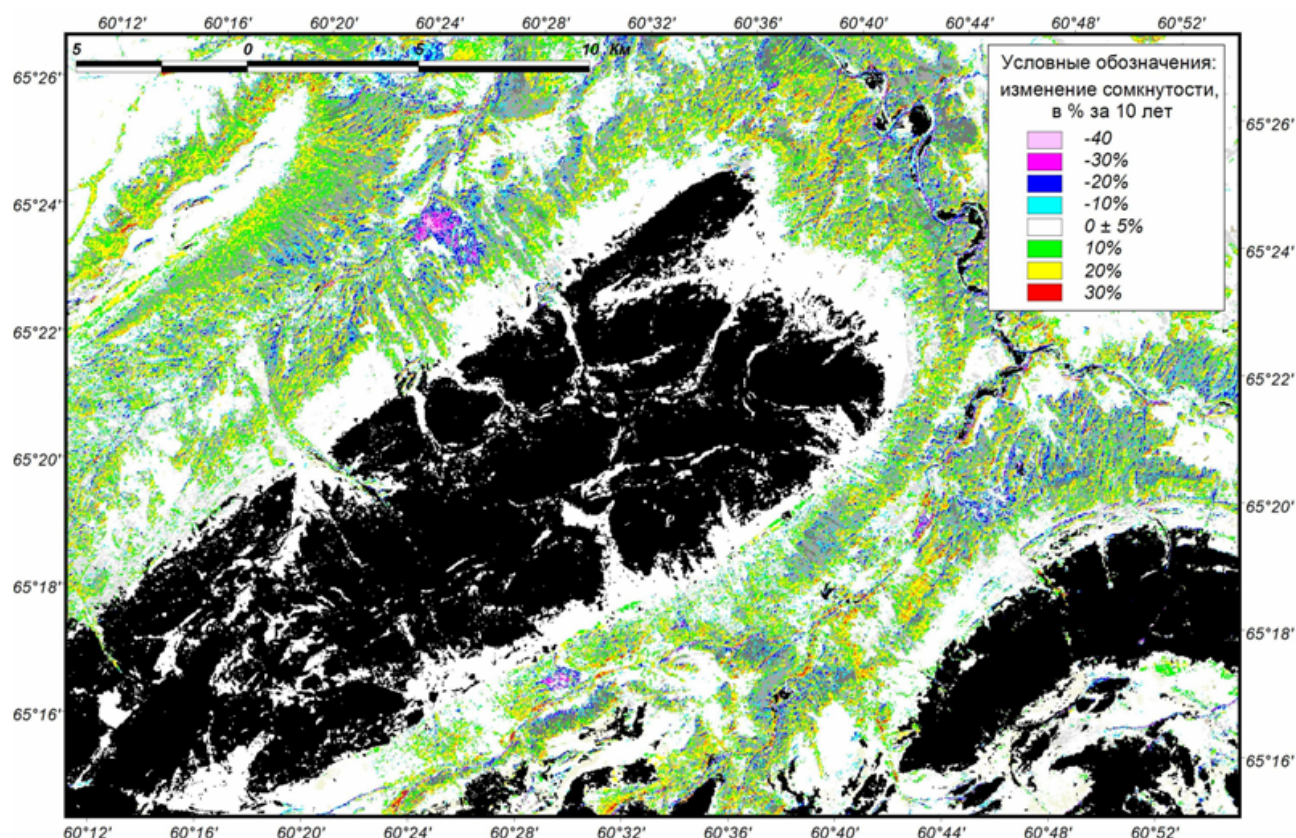


Рис. 2. Изменение сомкнутости лесных фитоценозов, в % сомкнутости за 10 лет.
Маска гор представлена черным цветом

TRENDS OF CLIMATIC CHANGES OF WOOD PHYTOCENOSES OF THE WESTERN SLOPES OF SUBPOLAR URALS

© 2010 V.V. Elsakov, I.O. Marushchak

Institute of Biology Komi Scientific Centre UB RAS, Syktyvkar

In work results showing the basic directions of density crone changes in foothill and mountain forests of Subpolar Urals for 18 years time period (1988-2006rr) on materials of satellite images Landsat analysis are presented. Attraction of series of winter images from the period 1988-2006 y. and method of spectral mixtures decomposition has allowed to establish changes of crones density parameter of not disturbed phytocenoses on the average up to 1-2% a year on sites, before generated larch gorests and light forests of ecotone zones near to border of forest-tundra. The most stable characteristics are noted for class of taiga forests.

Key words: *ecosystems of Subpolar Urals, density of crones, remote monitoring*