

**В.В. Фомин, Д.С. Капранов, М.М. Терентьев,  
А.А. Барова, А.В. Устинов, Н.Е. Циммерманн**

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

Проблеме глобального изменения климата и его влияния на отдельные экосистемы и Биосферу посвящено значительное количество работ (Kyrner, 1998; Изменение климата, 2001; Kullman 2002; Shiyatov, 2003; Kyrner, Paulsen, 2004; Моисеев и др., 2004; Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005). Высокогорные растительные сообщества находятся в жестких климатических условиях и начинают раньше реагировать на изменение климата по сравнению с сообществами, расположенными на более низких высотах.

Факты подъема лесной растительности в XX веке зарегистрированы в высокогорьях Швеции (Kullman, 2002, Kullman, 2003), Альп (Krajick, 2004), Новой Зеландии (Walter et al., 2002), а также в Африке (Shugart et al., 2001). Сравнительный анализ спутниковых снимков LANDSAT, полученных в 1974 – 1999 и 1972 – 2000 годах для двух районов, расположенных в северной части Канады, позволил установить факт продвижения лесной растительности в тундру (Masek, 2001).

Анализ ландшафтных фотографий горных вершин Урала, сделанных в первой и второй половинах XX века, свидетельствуют о вертикальном смещении границы лесной растительности на Южном и Полярном Урале (Moiseev, Shiyatov, 2003). Установлены факты смещения сомкнутого леса в тундру на Полярном Урале в XX веке (Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005) и цикличность изменения вертикального положения границы леса в данном районе за последние 1150 лет (Shiyatov, 2003).

Высокогорья Урала в пределах подгольцового пояса характеризуются высокой изменчивостью климатических условий. Они, как правило, не подвержены существенному антропогенному воздействию и поэтому являются хорошим объектом для изучения реакции растительности на изменение климата.

Хотя многие авторы приводят количественные величины вертикального сдвига лесной растительности в высокогорьях, однако, очень часто эти оценки статистически не обоснованы. Кроме того,

применение разных методических подходов и источников данных не позволяет сопоставить величину и скорость смещения лесной растительности в разных регионах Земли. Следует отметить, что при изучении пространственно-временной динамики верхней границы леса относительно мало используются картографические материалы, разных лет создания.

Цель работы – разработка методики количественной оценки вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы сомкнутого леса и анализ пространственно-временной динамики на Южном Урале во второй половине XX века.

### Объекты и методика исследований

На рис. 1 схематично изображено местоположение района исследований – горного массива Ирмель (1586 м н. у. м., 54°30'–54°34' с.ш., 58°49'–58°54' в.д.).



Рис. 1. Изображение цифровой модели рельефа Урала с указанием местоположения района исследований

Массив состоит из двух гор: Большой и Малый Иремель. Он сложен кварцевыми песчаниками, кварцито-песчаниковыми и подчиненными им темно-серыми и черными (углистыми) сланцами. По геоморфологическому строению данный район относится к сопочно-хребтовому рельефу (Цветаев, 1960, с. 8-16). Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), и береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.) являются основными древесными видами, формирующими верхнюю границу леса на Иремеле. На некоторых участках встречаются другие виды древесных растений: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.).

В непосредственной близости от района исследований нет крупных промышленных предприятий, поэтому уровень аэропромышленного загрязнения является фоновым для региона. Хотя исследуемый массив относительно популярное место отдыха туристов, тем не менее данный антропогенный фактор не может существенно повлиять на расположение и конфигурацию верхней границы леса, так как при восхождении на вершину используется ограниченное количество маршрутов.

Анализ пространственно-временной динамики верхней границы леса проводили с использованием

геоинформационной системы (ГИС) ARC/INFO (ESRI Inc., США). Источником данных о расположении верхней границы сомкнутого леса середине и конце XX века в районе исследований служили топографические карты масштаба 1:50000 1:100000, созданные в 1960 и 1990 гг. соответственно.

Оригиналы карт были отсканированы и конвертированы в растровый формат GRID ГИС ARC/INFO. На основе топографической карты района исследований М 1:100000 была проведена геопривязка растрового покрытия (слоя). На его основе цифрованием были созданы электронные слои, содержащие информацию о расположении и конфигурации границы леса. Также были созданы электронные покрытия, содержащие изолинии, отметки высот и объекты гидрологии. При помощи алгоритма TOPOGRID была создана гидрологически корректная цифровая модель рельефа местности (ЦМР). Она была использована при анализе изменения высотного положения границы сомкнутого леса. Размер ячеек ЦМР составляет 30 м×30 м.

Для оценки вертикального смещения границы леса линейные слои границ в начале и конце исследуемого периода были растеризованы и наложены на цифровую модель рельефа в ГИС (рис. 2). Информация о высоте каждой ячейки растрового слоя границ

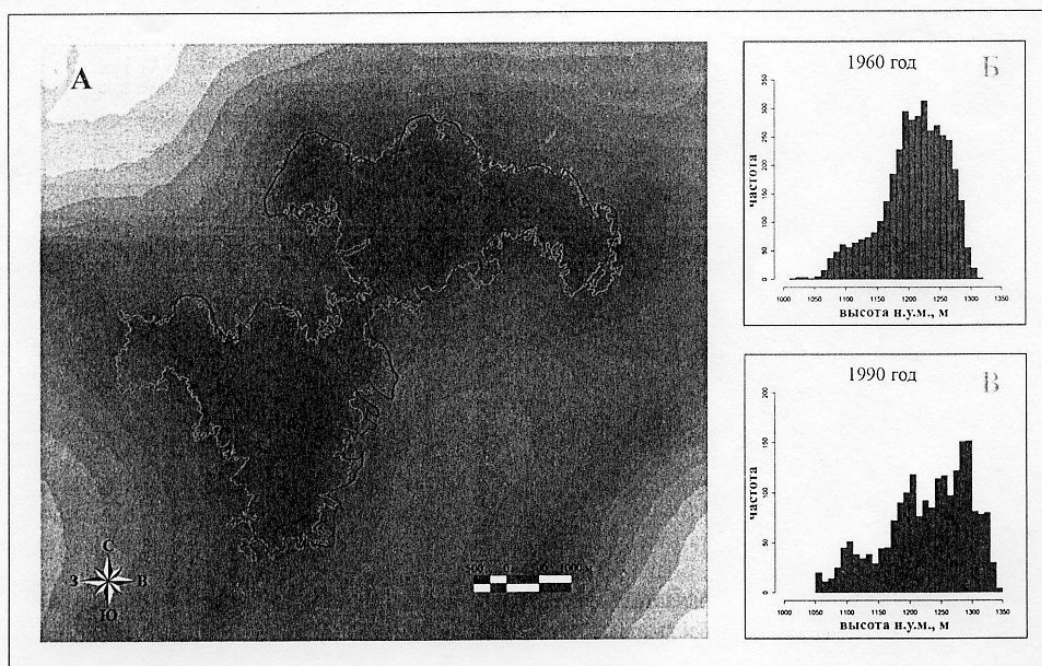


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая алгоритм расчета вертикального сдвига верхней границы леса. На рис. А приведено изображение цифровой модели рельефа местности с наложенными на нее линиями границы леса в 1960 (зеленый цвет) и 1990 (синий цвет). На рис. Б и В изображены гистограммы распределения высот ячеек цифровой модели рельефа, соответствующих границам леса в начале и конце исследуемого периода

была получена с цифровой модели рельефа. На основе этих данных были построены гистограммы распределения высот верхней границы леса в шестидесятых и девяностых годах XX века. Статистики полученных распределений были использованы для оценки величины вертикального смещения границы за исследуемый период.

Для оценки горизонтального смещения границы был разработан алгоритм, схема его иллюстрирующая представлена на рис. 3. От линии, характеризующей положение верхней границы леса в начале исследуемого периода, были построены буферные области. Граница такой области удалена от исходной линии на одинаковое расстояние. Величины буферов были кратны размеру ячейки цифровой модели рельефа. В результате проведения данной процедуры был получен слой, содержащий буферные области, последовательно сменяющие друг друга. После растеризации данного слоя на него было наложено растровое покрытие границы леса в конце исследуемого периода.

Таким образом, каждой ячейке границы леса в конце периода соответствует ячейка буферного слоя, содержащая величину смещения от границы леса в начале периода. На основе этих данных была построена гистограмма распределения горизонтального смещения верхней границы леса. Статистики распределения были использованы для количественной оценки величины горизонтального сдвига.

При анализе динамики климатических характеристик были использованы данные инструментальных измерений метеорологической станции «Таганай-гора» (1180 м над уровнем моря), характеризующие изменение климата в данном регионе.

Программная реализация алгоритма горизонтального смещения границы леса была выполнена в ГИС ARC/INFO с использованием языка AML. Статистическую обработку и анализ данных производили в статистическом пакете «R» (R Core Team [www.r-project.org](http://www.r-project.org)).

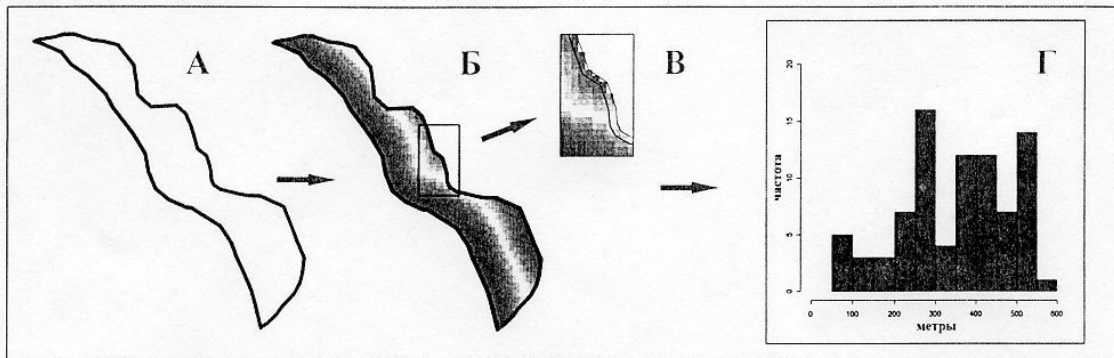


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая алгоритм оценки горизонтального сдвига верхней границы леса.  
 А – синим и зеленым цветом изображено положение границы леса в начале и конце исследуемого периода соответственно.  
 Б – изображение раstra горизонтального смещения. Изменение цвета от зеленого до красного означает увеличение расстояния от границы в начале исследуемого периода.  
 В – наложение растеризованной линии границы леса в конце исследуемого периода на растр горизонтального смещения.  
 Г – гистограмма распределения величины горизонтального смещения

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 4 приведены ландшафтные фотографии южного и юго-западного склона горы Малый Ирмель, сделанные в 1929 и 1999 годах. Эти материалы являются объективным доказательством вертикального подъема древесной растительности в исследуемом районе в XX веке. Однако данные фотографии не позволяют получить количественную оценку величины вертикального сдвига.

На рис. 5 изображен график хода среднегодовых температур за период с конца XIX до конца XX века на метеостанции «Таганай-гора». На рисунке

хорошо прослеживается тенденция к увеличению среднегодовых температур за указанный период. При этом следует отметить, что практически не выражен тренд увеличения средних температур за период май-сентябрь (данные не приведены). Это свидетельствует о потеплении холодного периода года. Увеличение температуры холодного сезона влияет на продолжительность залегания снежного покрова, скорость снеготаяния и влагообеспеченность почв.

Факт наличия вертикального подъема древесной растительности и анализ хода среднегодовых температур позволяет принять в качестве основной

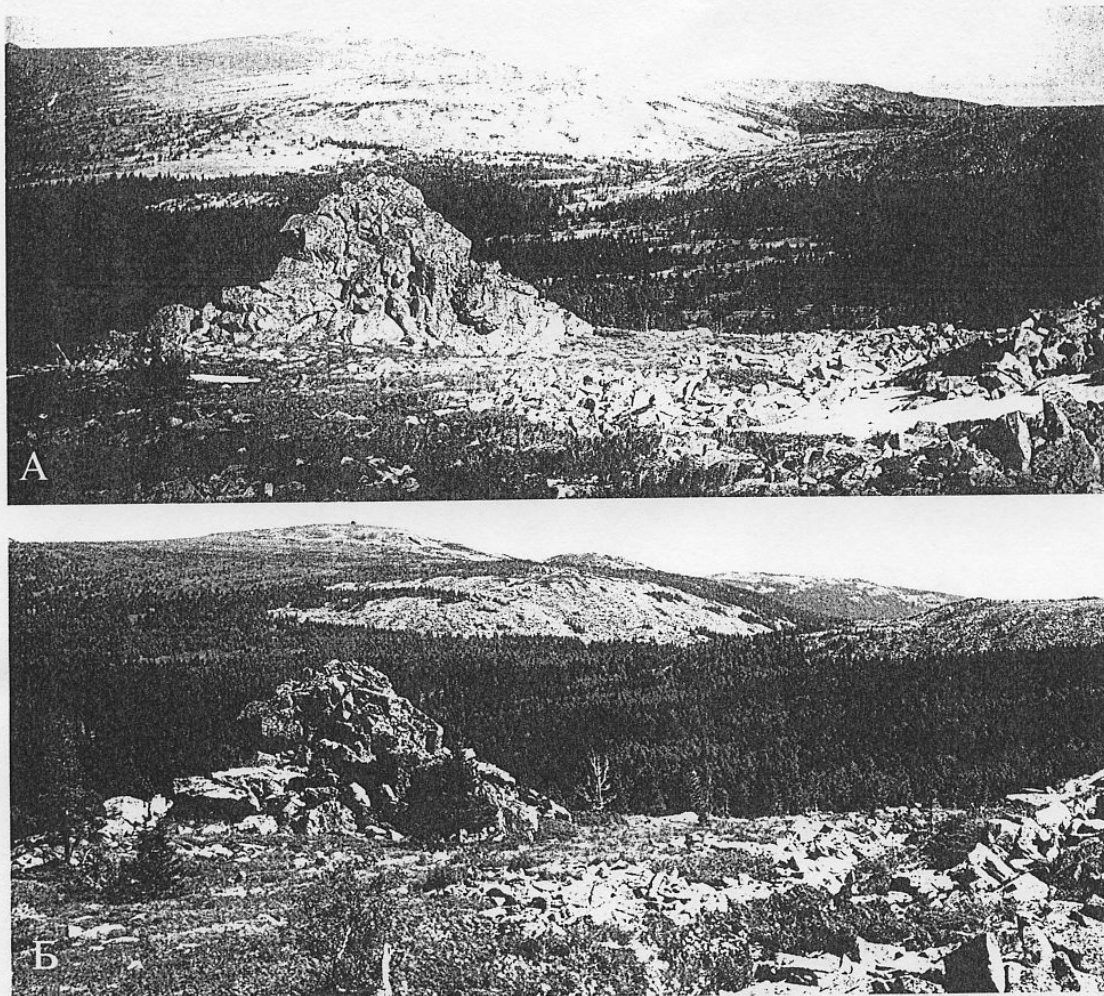


Рис. 4. Ландшафтные фотографии южного и юго-западного склонов горы Малый Ирмель, сделанные в 1929 (А) и 1999 (Б) годах

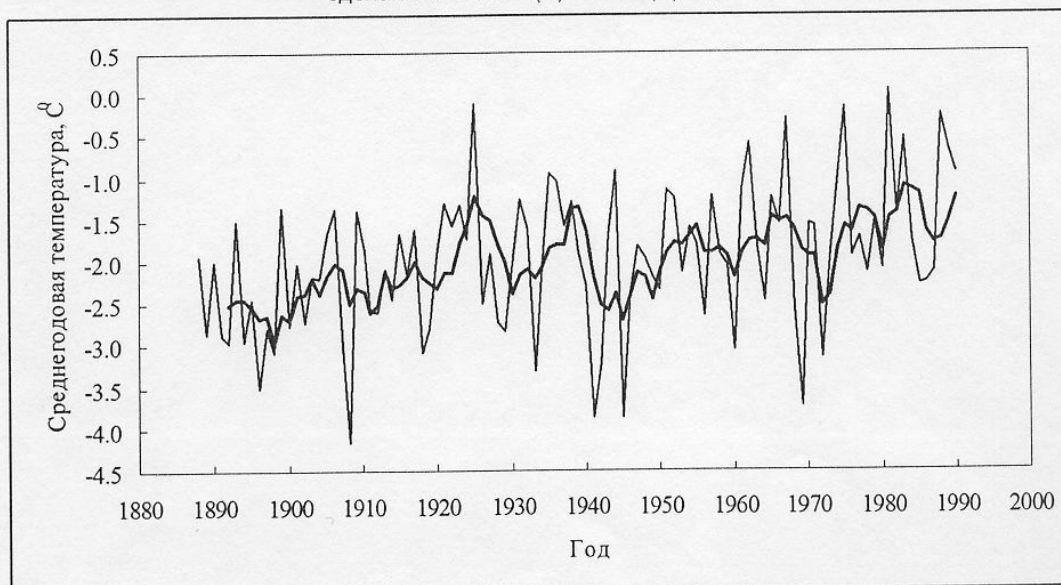


Рис. 5. График хода среднегодовой температуры на метеостанции Таганай-гора (Южный Урал). График пятилетнего скользящего среднего изображен жирной линией

рабочую гипотезу о климатогенной природе процесса смещения верхней границы леса на Урале.

Анализ ландшафтных фотографий и данные полевых исследований свидетельствуют об однонаправленном процессе сдвига лесной растительности вверх по склону. Наличие участков склона, на которых произошло снижение границы леса, объясняется, по-видимому, наличием искажений, которые могли возникнуть, как при их создании, так

и хранении картографических материалов, а также разными уровнями генерализации карт.

Для исключения данного эффекта при оценке горизонтального сдвига нами предложено исключить из анализа ячейки с совпадающими по модулю значениями сдвига. Построенная после этой процедуры гистограмма распределения характеризует «чистый» горизонтальный сдвиг границы для всего района исследований (рис. 6).

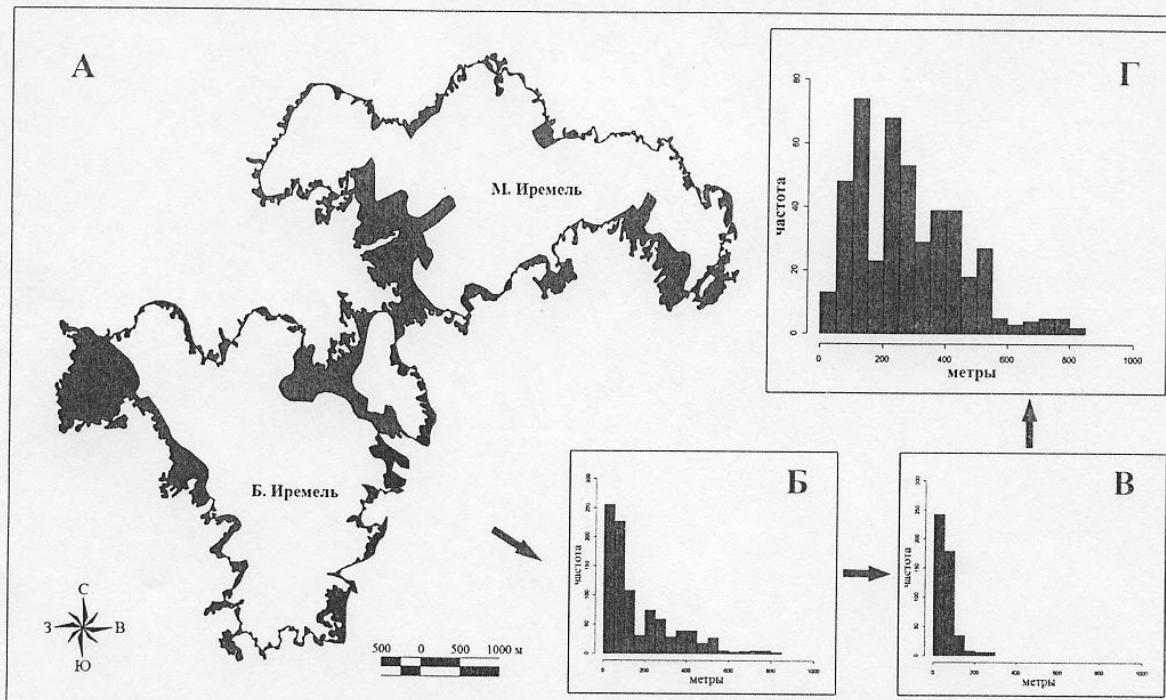


Рис. 6. Схема, иллюстрирующая алгоритм определения горизонтального сдвига верхней границы леса. На рис. А зеленым цветом изображены области подъема границы, синим области снижения (ложный сдвиг). На рис. Б и В приведены гистограммы распределения величин сдвигов для областей подъема и снижения границы. Г – гистограмма «чистого» горизонтального сдвига верхней границы леса

Оценка вертикального сдвига производится на основе разности величин статистик распределений высот ячеек границы леса в начале и конце исследуемого периода (рис. 2). Можно предположить, что величина систематической погрешности одинакова для этих двух границ, поэтому полученная разность также характеризует «чистый» вертикальный сдвиг.

В табл. 1 приведены статистики распределения высот границ сомкнутого леса в 1960 и 1990 годах. Медиана, максимальное и среднее значение горизонтального сдвига составляют значения 270, 810 и 284 метра соответственно. Полученные распределения отличаются от нормального, поэтому для оценки величины сдвига предлагается использовать не среднее значение, а медиану. Величины вертикального и

горизонтального сдвигов по медиане составляет 25 и 270 метров и, следовательно, скорость подъема границы за исследуемый период в данных районах составляет примерно 0.83 и 9.00 метров в год соответственно.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований пространственно-временной динамики верхней границы леса на Полярном (Шиятов, Терентьев, Фомин, 2005) и Северном Урале (Капралов и др., 2004). В данных районах также установлена тенденция подъема границы лесной растительности в XX веке. Установленные факты позволяют предполагать, что продвижение лесной растительности вверх по склонам горных массивов характерно для всего Урала, и обусловлено региональным потеплением климата в XX веке.

Таблица 1

**Статистические параметры распределений высот участков верхней границы леса на горном массиве Иремель**

Параметр, м \ Год	1960	1990
Минимум	1013	1052
Максимум	1313	1341
Среднее	1209	1228
Медиана	1215	1240

Геоэкология

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке ИНТАС (грант 01-0052) и РФФИ (гранты 04-04-48466 и 06-04-49359), а также технической поддержке ООО «ДАТА+» – официального представителя компаний производителей программного обеспечения ESRI и Leica Geosystems (США).

**ЛИТЕРАТУРА**

- Капралов Д.С., Фомин В.В., Галлеев А.С., Доброноженко А.П., Терентьев М.М. Климатогенная пространственно-временная динамика древостоев основных лесообразующих пород, произрастающих на Северном Урале на верхнем пределе их распространения // Сб. статей Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения (экологические аспекты)». Красноярск. 2004. с. 183-187.
- Изменение климата, 2001 г. Обобщенный доклад. Ред. Р.Т. Уотсон. ВМО-ЮНЕП. Женева. 2003. 220 с.
- Моисеев П.А., Ван дер Меер М., Риглинг А., Шевченко И.И. Влияние изменений климата на формирование поколений ели сибирской в подгольцовых древостоях Южного Урала // Экология. 2004. № 3. с. 1-9.
- Цветаев А.А. Горы Иремель (Южный Урал). Физико-географический очерк. Уфа. 1960. 83 с.
- Шиятов С.Г., Теретьев М.М., Фомин В.В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. 2005. № 2. с 83-90.
- Moiseev P.A., Shiyatov S.G. Vegetation Dynamics at treeline ecotone in the Ural Highlands, Russia // Ecological Studies. 2003. Vol. 167. p. 423-435.

- Kirner C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanations // Oecologia. 1998. Vol. 115. p. 445-459.
- Kirner C., Paulsen J.A world-wide study of high altitude treeline temperatures // Journal of Biogeography. 2004. Vol. 31. p. 713-732.
- Krajick K. All downhill from here? // Science. 2004. Vol. 303. p. 1600-1602.
- Kullman L. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes // Journal of ecology. 2002. Vol. 90. p. 68-77.
- Kullman L. Recent reversal of Neoglacial climate cooling trend in the Swedish Scandes as evidence by mountain birch tree-limit rise // Global and planetary change. 2003. Vol. 36. p. 77-88.
- Masek J.G. Stability of boreal forest stands during recent climate change: evidence from Landsat satellite imagery // Journal of biogeography. 2001. Vol. 28. p. 967-976.
- Shiyatov S.G. Rates of change in the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // Pages News. 2003. Vol. 11. p. 8-10.
- Walter G-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. Ecological responses to recent climate change // Nature. 2002. Vol. 416. p. 389-395.
- Shugart H.H., French N.H.F., Kasischke E.S., Slawski J.J., Dull C.W., Shuchman R.A., Mwangi J. Detection of vegetation change using reconnaissance imagery // Global Change Biology. 2001. Vol. 7. p. 247-252.