

## О ТРАНСФОРМАЦИИ ГРАНИЦ МЕЖДУ ЛЕСНОЙ И ЛЕСО-СТЕПНОЙ ГЕОГРАФИЧЕСКИМИ ЗОНАМИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

**Анализ пространственного распределения древостоев по азимутальным направлениям склонов с дискретизацией 1 и 45°, соответственно по 360 секторам и по 8 секторам полного угла.**

**Ключевые слова:** элементы рельефа, распределение древостоев, динамика древостоя, снежный покров, температурное воздействие.

Реакции древесной растительности на изменения климата наиболее вероятны, где температура ограничивает рост растений. Следует ожидать, что реакция лесов на изменения климата будет неоднородной, поскольку продвижение древесной растительности вверх зависит от мезо- и микрорельефа территории, от доступности защищенных от ветра локусов. Наличие таких локусов обусловлено основными топографическими параметрами рельефа: высотой над уровнем моря (у. м.), азимутом и крутизной склона. В особых случаях (например, воздействие пожара) топографические свойства могут повлиять на пространственную структуру леса. Однако количественный анализ воздействия рельефа на изменение верхней границы леса в литературе не представлен. Одним из подходов к решению такого рода задач является анализ временного ряда карт растительности на основе цифровой модели рельефа. Однако данный подход ограничен недостаточностью данных инвентаризации лесов. В то же время имеющиеся топографические карты отображают ряд основных характеристик лесного покрова: на них представлены границы «сомкнутых древостоев» (сомкнутость крон  $\geq 0,25$ ) и редколесий (сомкнутость крон  $< 0,25$ ). На топокартах также представлена основная таксационная информация (видовой состав, высота и диаметр деревьев).

Проведен анализ распределения сомкнутых древостоев в зависимости от топографии местности (высоты над у. м., азимута и крутизны склонов). Климат — резко континентальный, температура января варьирует от  $-12$  до  $-32^\circ\text{C}$ , июля — от  $9$  до  $18^\circ\text{C}$ . Количество осадков составляет приблизительно  $390$  мм/год, из них почти  $60\%$  осадков выпадает в летнее время. За последние десятилетия наблюдался положительный тренд

средних зимних и летних температур, а также зимних осадков. На исследуемой территории не обнаружено признаков рубки лесов или пожаров. Параметры рельефа, использованные в анализе пространственного распределения древостоев, извлечены из цифровой модели рельефа SRTM с разрешением по горизонтали  $90$  м, по вертикали  $15$  м. На пробных площадках в пределах трансект измерялись сомкнутость крон, диаметр и высота деревьев; отмечались границы сомкнутых древостоев. Все пробные площадки были геопозиционированы, наземные данные использовались для дешифрирования снимка. Рассматривались только сомкнутые древостои. Карты были отсканированы с разрешением  $300$  точек на дюйм, географически привязаны векторизованы. Обучающие выборки (набор эталонов, по которым производилась классификация сомкнутых древостоев и фона) были сформированы по материалам полевых исследований и топографическим картам. Поскольку спектральные сигнатуры обучающих выборок имели нормальное распределение, был применен метод максимального правдоподобия с нечеткой сверткой. Из  $384$  элементов «фона» правильно классифицировано  $358$ , из  $512$  элементов класса «древостои» правильно классифицировано  $408$ . Общая точность классификации, оцененная по матрице ошибок и к статистике, оказалась удовлетворительна ( $85\%$ ,  $k = 0,7$ ). Скорость смещения границы древостоев оценивалась путем сравнения границ на топографической карте  $1960$  г. и картосхеме  $2002$  г. В анализе использовалась цифровая модель рельефа SRTM. Оценка изменения границ ( $2002$  г. относительно  $1960$  г.) была выполнена вдоль линий сканирования (т. е. вдоль N трансект,  $N = 170$ ), пересекающих границы древостоев. Смещение границы древостоев по высоте определялось как разность вы-

сот границ древостоев в 2002 и 1960 гг. Необходимо отметить, что верхняя граница сомкнутых лесов фрагментирована, сформирована мозаикой групп деревьев, что усложняло однозначное определение границы леса.

Поскольку распределение элементов рельефа с заданной высотой, азимутом и крутизной склона неравномерно (например, пикселей с высотой 2400 – 2500 м гораздо меньше, чем с высотой 2000 – 2100 м), была выполнена следующая нормировка.

Площадь древостоев, расположенных на рельефе с заданными значениями азимута, крутизны склона и высоты над у. м., соотносилась с полной площадью участков с такими же параметрами рельефа для всей анализируемой территории. Скорость смещения границы древостоев оценивалась путем сравнения границ на топографической карте 1960 г. и картосхеме 2002 г. В анализе использовалась цифровая модель рельефа SRTM. Оценка изменения границ была выполнена вдоль линий сканирования, пересекающих границы древостоев. Смещение границы древостоев по высоте определялось как разность высот границ древостоев в 2002 и 1960 гг. Необходимо отметить, что верхняя граница сомкнутых лесов фрагментирована, сформирована мозаикой групп деревьев, что усложняло однозначное определение границы леса.

В связи с этим принято рабочее определение, согласно которому к лесу относятся фрагменты, имеющие площадь не менее 5 га.

Анализ пространственного распределения древостоев по азимутальным направлениям склонов проведен с дискретизацией 1 и 45° (т. е. изучалось распределение соответственно по 360 секторам и по 8 секторам полного угла). Азимут распределения древостоев есть вектор, разделяющий диаграмму площади древостоев на две равные части.

По высоте над у. м. древостои были разделены на группы, расположенные в 100-метровых высотных интервалах. По крутизне склона выделено восемь интервалов (0 – 5, 5 – 10, ..., 35 – 40°), из которых последний соответствует предельным значениям крутизны, на которых возможно произрастание деревьев.

Был проведен анализ изменения медиан распределений древостоев по высоте над у. м. и крутизне склона. Медиана высоты вычислялась как значение высоты над у. м., разделяю-

щее распределение древостоев по высоте над у. м. на две равные части. Аналогично определялась медиана крутизны склона.

Поскольку распределение элементов рельефа с заданной высотой, азимутом и крутизной склона неравномерно, была выполнена следующая нормировка. Площадь древостоев, расположенных на рельефе с заданными значениями азимута, крутизны склона и высоты над у. м., соотносилась с полной площадью участков с такими же параметрами рельефа для всей анализируемой территории

$$K_i = \frac{A_i}{B_i} \quad (1)$$

Здесь индекс  $i$  обозначает  $i$ -ю категорию элемента рельефа;

$K_i$  – нормированную площадь для  $i$ -й категории элемента рельефа;

$A_i$  – площадь древостоев данного наземного класса в пределах  $i$ -й категории элемента рельефа;

$B_i$  – общую площадь  $i$ -й категории элемента рельефа на всей анализируемой территории.

Растровые изображения азимутальных направлений склонов и крутизны склонов вычислялись стандартными методами ГИС из цифровой модели местности (ЦМР). В ЦМР значения яркости каждого пикселя (с координатами  $x, y$ ) соответствуют значению высоты над уровнем моря. Для вычисления азимутального направления и крутизны склона применялось окно 3×3 пикселя (элемента разрешения). Для каждого пикселя вычислялись средние вариации высот ( $\Delta x$ ) и ( $\Delta y$ ) по осям  $x$  и  $y$ . Азимут определялся из уравнения, приведенного в [1]

$$\theta = \frac{180}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \quad (2)$$

где  $\theta$  – азимутальное направление склона, а  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – средние вариации вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Среднеквадратическая ошибка  $\delta(\theta)$  оценки азимутального направления вычислялась по формуле [2]

$$\delta(\theta) = \frac{180\delta H}{\pi} \sqrt{\frac{2}{3((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2)}} \quad (3)$$

где  $\delta H$  – относительная ошибка определения высоты, равная 8,7 м. Крутизна склона (в градусах) вычислялась по следующей формуле [3]

$$\beta = \frac{180}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{X_5}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{Y_5}\right)^2}}{2} \right) \quad (4)$$

где  $X_s$  и  $Y_s$  – пространственное разрешение пикселя ( $L$ ) вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно,  $L = X_s = Y_s = 90 \text{ м}$  [4].

Среднеквадратическая ошибка вычисления крутизны склона  $\delta(\beta)$  определялась следующим образом [5], [6]

$$\delta(\beta) = \frac{587,88\delta H}{\pi L(4 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2)} \quad (5)$$

Ошибка вычисления азимута в данном исследовании была  $\delta(\theta) < 13^\circ$ , а ошибка вычисления крутизны склона  $\delta(\beta) < 4,5^\circ$  ( $< 3,5^\circ$  для склонов  $< 30^\circ$ ) для 90% исследуемой территории [7], [8], [9].

Распределение древостоев в горах анизотропно по азимуту, высоте над у. м. и крутизне склонов.

Распределение древостоев по азимуту склонов показывает, что это распределение является асимметричным и зависит от высоты над у. м. С увеличением высоты над у. м. радиус-вектор, указывающий максимум распределения древостоев по азимуту, изменяясь по часовой стрелке, становится направленным на восток на пределе произрастания древостоев. Суммарное смещение радиуса-вектора составило  $120 \pm 13^\circ$ . За анализируемый период (1960 – 2002 гг.) общая площадь сомкнутых древостоев увеличилась в примерно 1,5 раза. Полученные данные указывают на то, что увеличение площади леса зависит от высоты над у. м. и крутизны склона. Таким образом, продвижение границы древостоев по высоте составило  $63 \pm 37 \text{ м}$ , что соответствует  $1,5 \pm 0,9 \text{ м/год}$ . Распределение древесной растительности в зависимости от крутизны склонов Медиана крутизны склонов для территории, на которой расположены древостои, больше таковой для всей территории (включающей лесные и нелесные участки). С увеличением высоты над у. м. положение медианы распределения древостоев по крутизне склонов смещается в сторону склонов с большей крутизной. В течение анализируемого периода наблюдалась миграция древесной растительности на участки, имеющие малые значе-

ния крутизны склона, и в меньшей степени – на участки с большими значениями крутизны склонов.

Для рассматриваемых древостоев оно изменилось в течение периода наблюдения 1960 – 2002 гг. Азимутальное распределение древостоев асимметрично и зависит от высоты над у. м. На низкогорье леса преобладают на северных склонах. С увеличением высоты медиана азимута распределения древостоев, двигаясь по направлению движения часовой стрелки, становится ориентированной на восток на высотном пределе произрастания древостоев. Эти изменения, вероятно, обусловлены воздействием преобладающих ветров, увеличивающихся с высотой произрастания. Поскольку для исследуемой территории отсутствуют данные о скорости и направлении ветра, оценка преобладающего направления ветра была выполнена на основании косвенных данных. В их число входили наблюдения по ориентации поваленных деревьев, форме древесных крон и форме радиального прироста на спилах. Все перечисленные косвенные признаки указывают на то, что преобладающим является северо-западное направление ветра. Стоит отметить, что формы распределения ширины годичных колец и крон деревьев по азимуту подобны пространственному распределению древостоев по азимуту. Воздействие ветра формирует резкую границу древостоев на наветренных склонах, тогда как на подветренных склонах наблюдается диффузная граница леса. В общем случае граница леса мозаична, поскольку выживание деревьев и возобновление леса определяются наличием защищенных от ветра элементов рельефа. Таким образом, азимутальное распределение лесов формируется в основном под воздействием доминирующих ветров и дефицита влаги. В отношении крутизны склонов древостои занимают склоны, имеющие большую, чем средняя по рельефу, крутизну. С увеличением высоты над у. м. древостои осваивают более крутые, защищенные от ветра склоны: при переходе от низкогорий к высокогорьям медиана распределения древостоев по крутизне склона увеличивается с  $17 - 18^\circ$  до значений более  $20^\circ$ . Как было отмечено, медиана крутизны склона для древостоев отличается от медианы крутизны склонов для всей рассматриваемой территории.

За период наблюдения общая площадь древостоев увеличилась приблизительно в 1,5 раза, причем прирост площади древостоев зависел от высоты произрастания и крутизны склонов. Увеличение площади древостоев наблюдалось преимущественно в нижнем поясе. При этом деревья поселялись в основном на пологих (менее защищенных от ветра) склонах во всех высотных поясах. Миграция деревьев в локусы, относительно плохо защищенные от ветра, указывает на уменьшение воздействия зимней десикации и снежной абразии – основных причин гибели возобновления (молодых растений). Освоение деревьями прирусловых пространств обусловлено, вероятно, ускоренным таянием снежного покрова весной, что предохраняет возобновление и подрост от гибели вследствие «вымывания». Известно, что большая высота снежного покрова и его позднее таяние в низинах (например, вдоль рек) являются одним из основных факторов, ограничивающих укоренение и рост древесных растений. Предполагается, что в этих местах с повышением температуры рост деревьев будет ускоряться. Увеличение сомкнутости древостоев вдоль водотоков является примером климатически обусловленной нисходящей миграции деревьев. Наряду с увеличением площади лесов в 1960 – 2002 гг. наблюдалось смещение верхней границы древостоев вверх со скоростью  $1,5 \pm 0,9$  м/год. В абсолютных величинах наблюдалось смещение границы древостоев приблизительно на  $63 \pm 37$  м.

Высота снежного покрова весьма существенна для выживания подроста. Критический период для подроста – это его выход выше уровня снежного покрова, когда резко увеличивается риск его повреждения вследствие десикации и снежной абразии, что приводит к гибели подроста либо его трансформации в стланиковую форму. Деревца, преодолевшие уровень снежного покрова, нередко не имеют ветвей в зоне воздействия снежной абразии. Имеются указания

на корреляционную связь между увеличением количества зимних осадков и смещением границы древостоев. Однако чрезмерное количество зимних осадков может отрицательно повлиять на подрост из-за уменьшения периода вегетации.

В течение анализируемого периода (1960 – 2002 гг.) наблюдался положительный тренд температуры как холодного, так и теплого сезонов года. Повышение температуры произошло преимущественно в холодный сезон года (сентябрь – июнь) и составило  $1,3^\circ\text{C}$  по сравнению с аналогичным периодом 1917 – 1959 гг. Следовательно, увеличение зимней температуры примерно на  $1^\circ\text{C}$  позволяет продвинуться границе древостоев вверх примерно на 50 м. Возможно, что это – оценка снизу, поскольку равновесие с климатом, по видимому, еще не успело установиться. Повышение зимней температуры благоприятно также для возобновления, поскольку сопровождается уменьшением десикации и снежной абразии – главных причин повреждения и гибели подроста [10].

Установлено, что пространственная структура высокогорных лесов анизотропна и зависит от азимута, крутизны склона и высоты над у. м. Древостои на данной высоте произрастают преимущественно на склонах с крутизной выше средней. С увеличением высоты над у. м. древостои смещаются на защищенные склоны большей крутизны.

Азимутальное распределение древостоев верхнего высотного пояса формируется под воздействием преобладающих ветров и дефицита влаги.

Наблюдаемое потепление климата способствует освоению деревьями локусов, относительно слабо защищенных от зимней десикации и снежной абразии. Наблюдается увеличение площади древостоев как вследствие трансформации редины в сомкнутые древостои, так и из-за миграции деревьев по градиенту высоты.

15.05.2013

#### Список литературы:

1. Leica Geosystems, 2005. ERDAS Field Guide, <http://www.leica-geosystems.com>.
2. Taylor, J.R. An Introduction to Error Analysis, Mill Valley, University Science Books / J.R. Taylor., 1982.
3. Holtmeier, F.-K. Sensitivity and response of the Northern Hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales, *Global Ecology and Biogeography* / F.K. Holtmeier., G. Broll – vol. 14, 2005. pp. 395–410.
4. Kullman, L. Holocene pine tree-line evolution in the Swedish Scandes: recent tree-line rise and climate change in a longterm perspective, *Boreas* / L. Kullman., L. Kjallgren – vol. 35, 2006. pp. 159–168.
5. Kharuk, V. I. Expansion of evergreen conifers to the larch-dominated zone and climatic trends, *Rus. J. Ecology* / V. I. Kharuk., M. L. Dvinskaya., K.J. Ranson., S.T. Im – vol. 36, No. 3, 2005. pp. 164–170.
6. Shiyatov, S. G. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century, *Rus. J. Ecology* / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev., V. V. Fomin., N. E. Zimmermann – vol. 4, No. 38, 2007. pp. 223–227.

7. Batllori, E. Seedling recruitment, survival and facilitation in alpine *Pinus uncinata* tree line ecotones. Implications and potential responses to climate warming, *Global Ecology and Biogeography* / E. Batllori., J. Camarero., J. Ninot., E. Gutierrez – vol. 18, No. 40, 2009. pp. 460–472.
8. Devi, N. Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century, *Global Change Biology* / N. Devi, F. Hagedorn., P. Moiseev., H. Bugmann., S. Shiyatov – vol. 14, No. 7, 2008. pp. 1581–1591.
9. Korner, C. The green cover of mountains in a changing environment, in: *Advances in Global Change Research, Global Change and Mountain Regions*, / U. M. Huber, H. K. M. Bugmann, M. A. Reasober (eds.), Dordrecht, Springer – vol. 23, 2005. pp. 367–375.
10. Kharuk, V.I. Response of *Pinus sibirica* and *Larix sibirica* to climate change in southern Siberian alpine forest-tundra ecotone, *Dcandinav. J Forest Res.*, / V. I. Kharuk., K. J. Ranson., S. M. Im., V. L. Dvinskaya – vol. 24, No. 2, 2009. pp. 130 – 139.

Сведения об авторе:

**Изотов Борис Алексеевич**, доцент кафедры летательных аппаратов  
Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент  
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел.: (3532) 752858, e-mail: baizotov@yandex.ru

**UDC 574.577**

**Izotov B.A.**

Orenburg state university, e-mail: baizotov@yandex.ru

**ON THE TRANSFORMATION OF BOUNDARIES BETWEEN FOREST AND FOREST-STEPPE GEOGRAPHICAL ZONES UNDER CLIMATE CHANGE**

The analysis of spatial distribution of forest stands in azimuthal directions of slopes with digitization 1 and 45°, accordingly on 360 sectors and on 8 sectors of a full corner.

Key words: distribution of relief items stocked, dynamics of forest stands, snow cover, temperature effects.

**Bibliography:**

1. Leica Geosystems, 2005. ERDAS Field Guide, <http://www.leica-geosystems.com>.
2. Taylor, J.R. An Introduction to Error Anylysis, Mill Valley, University Science Books / J.R. Taylor., 1982.
3. Holtmeier, F.-K. Sensitivity and response of the Northern Hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales, *Global Ecology and Biogeography* / F.K. Holtmeier., G. Broll – vol. 14, 2005. pp. 395–410.
4. Kullman, L. Holocene pine tree-line evolution in the Swedish Scandes: recent tree-line rise and climate change in a longterm perspective, *Boreas* / L. Kullman., L. Kjallgren – vol. 35, 2006. pp. 159–168.
5. Kharuk, V. I. Expansion of evergreen conifers to the larch-dominated zone and climatic trends, *Rus. J. Ecology* / V. I. Kharuk., M. L. Dvinskaya., K.J. Ranson., S.T. Im – vol. 36, No. 3, 2005. pp. 164–170.
6. Shiyatov, S. G. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century, *Rus. J. Ecology* / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev., V. V. Fomin., N. E. Zimmermann – vol. 4, No. 38, 2007. pp. 223–227.
7. Batllori, E. Seedling recruitment, survival and facilitation in alpine *Pinus uncinata* tree line ecotones. Implications and potential responses to climate warming, *Global Ecology and Biogeography* / E. Batllori., J. Camarero., J. Ninot., E. Gutierrez – vol. 18, No. 40, 2009. pp. 460–472.
8. Devi, N. Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century, *Global Change Biology* / N. Devi, F. Hagedorn., P. Moiseev., H. Bugmann., S. Shiyatov – vol. 14, No. 7, 2008. pp. 1581–1591.
9. Korner, C. The green cover of mountains in a changing environment, in: *Advances in Global Change Research, Global Change and Mountain Regions*, / U. M. Huber, H. K. M. Bugmann, M. A. Reasober (eds.), Dordrecht, Springer – vol. 23, 2005. pp. 367–375.
10. Kharuk, V.I. Response of *Pinus sibirica* and *Larix sibirica* to climate change in southern Siberian alpine forest-tundra ecotone, *Dcandinav. J Forest Res.*, /V. I. Kharuk., K. J. Ranson., S. M. Im., V. L. Dvinskaya – vol. 24, No. 2, 2009. pp. 130 – 139.