



УДК 528.7+914.7(571.5)

Динамика верхней границы леса на Байкальском хребте

И. Н. Владимиров (garisson@irigs.irk.ru)

Аннотация. В статье предложен метод исследования динамики верхней границы леса. Совместное использование разновременных космических снимков Landsat, вегетационного индекса NDVI, цифровой модели рельефа ASTER GDEM 2 позволяет проводить количественную оценку вертикального и горизонтального сдвига верхней границы леса, связанного с возможными последствиями глобального потепления. На основе предложенной методики получены современные данные о динамике верхней границы леса на Байкальском хребте за последние полвека.

Ключевые слова: динамика, верхняя граница леса, NDVI, цифровая модель рельефа (ЦМР), Байкальский хребет.

Введение

В последнее время анализ динамики верхней границы леса привлекает к себе особое внимание в связи с проблемой климатических изменений. Высокогорные лесные сообщества являются идеальным объектом для исследования реакции растительности на климатические изменения. Предполагаемое смещение верхней границы распространения лесов рассматривается как одно из возможных последствий глобального потепления и связано с тем, что лесные сообщества на верхнем пределе своего произрастания находятся в более жестких климатических условиях и начинают раньше реагировать на изменение климата по сравнению с сообществами, расположенными на более низких высотах.

В ряде публикаций установлено проникновение древесной растительности в тундру как на северной, так и на высотной границах леса, а также возрастание сомкнутости притундровых лесов и увеличение радиального прироста деревьев в последние десятилетия [11–13, 16]. Факты подъема лесной растительности в конце XX – начале XXI в. зарегистрированы на Урале [10; 14], в Альпах [18], в высокогорьях Канады [21; 26] и США [20; 27; 30; 34; 35], Швеции [22–25], Новой Зеландии [33] и Африки [17].

Территория исследования

Территорией исследования выбрана центральная часть Байкальского хребта (верховья рек Куркула Ленская, Куркула Байкальская, Молокон) (рис. 1).

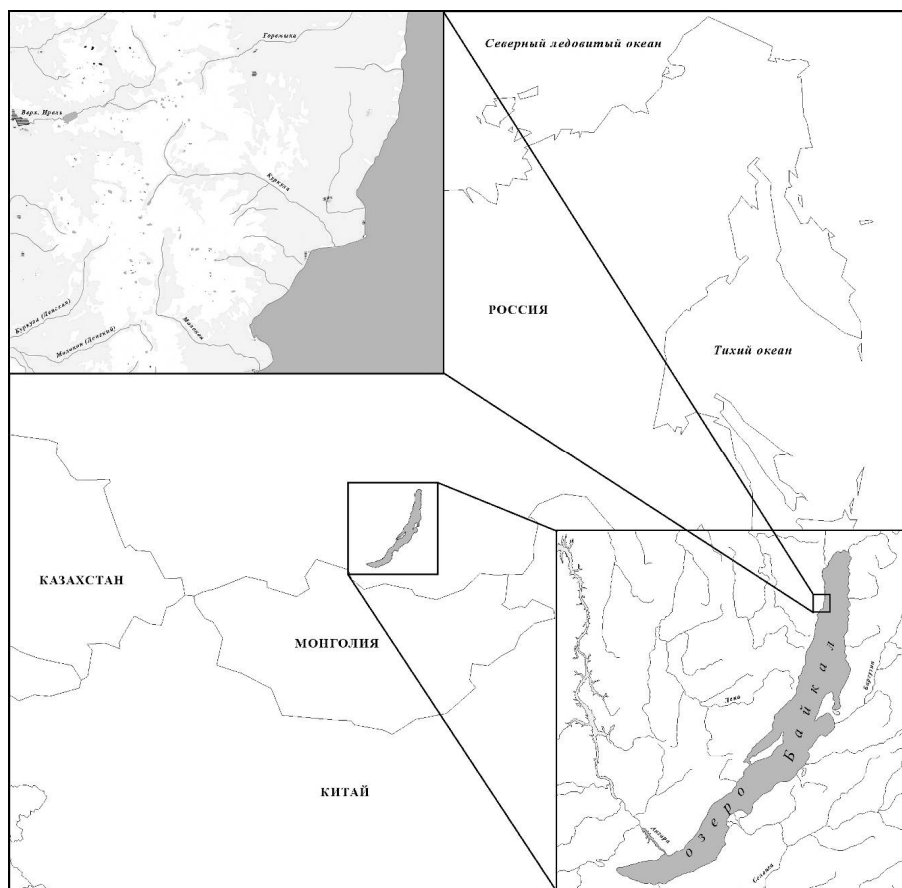


Рис. 1. Географическое положение территории исследования

Байкальский хребет – горный хребет в Прибайкалье на территории Иркутской области и Бурятии. Высшая точка – гора Черского (2572 м), преобладающие высоты хребта – 1900–2200 м. Склоны до 900–1000 м занимают лесостепь и сосновый бор, выше – темнохвойная тайга. В средней и северной частях преобладает лиственничная тайга. Выше 1400 м преобладает лиственничное редколесье. В условиях наибольшей влажности климата (на западном склоне Байкальского хребта) усиливается роль темнохвойных пород: *Abies sibirica*, *Picea obovata*, *Pinus sibirica*. По данным Н. С. Водопьяновой и др. [4], во влажном климате Северного Прибайкалья граница леса проходит на высоте 1100–1300 м и образована темнохвойными породами, в основном пихтой и елью, в условиях сухого климата она проходит на высоте 1700–1900 м. В районах, занимающих промежуточное по влажности климата положение, лесной пояс тянется до высоты 1500–1600 м. Верхнюю лесную полосу образуют насаждения лиственницы, а также кедра и ели. В некоторых случаях общая закономерность нарушается влиянием условий рельефа. На очень крутых каменистых склонах граница

леса проходит ниже своего климатического уровня. Влияет также экспозиция склонов.

Интерес к данному району обусловлен рядом объективных причин. Во-первых, территория Северного Прибайкалья является зоной взаимодействия (взаимопроникновения) семи крупнейших растительных фратрий формаций Северной Азии и ее важным биогеографическим рубежом. Изучение организации растительного покрова, структурно-динамических особенностей, закономерностей строения растительных сообществ, характера динамики фитоценозов в условиях климатических и антропогенных изменений, динамических и эволюционных процессов в подобных переходных зонах является важной задачей географических исследований [3]. Во-вторых, в настоящее время данный район малонаселен и практически не испытывает антропогенных нагрузок, что позволяет использовать его в качестве модельного участка для анализа динамики верхней границы леса.

Материалы и методы

В настоящее время существует большое количество подходов и критериев к интерпретации верхней границы леса и, в частности, распространения древесной растительности. Выделяют границу сомкнутых лесов, границу редколесий и парковых лесов, границу криволесий, границу отдельных деревьев [6; 15; 29; 32]. Рассматривают границу как переход между лесными и безлесными пространствами (*timberline*) и границу леса как предел непрерывных лесов (*forestline*). Там, где переход резок, эти две границы совпадают между собой. Крайний предел распространения прямо стоящих деревьев известен как древесная граница (*treeline*). Ее обычно образуют рассеянные группы деревьев или их отдельно стоящие экземпляры. Подчас трудно решить, считать ли за деревья искривленные низкорослые древесные формы, не превышающие 2–3 м высоты, именуемые немецким термином «круммхольц». Обычно их группы состоят из одного или двух деревьев, в центре обрамленных юбкой ветвей, и горизонтально простирающихся корней. За границей круммхольца (*krumholz line*) деревья не превышают высоты кустарниковых зарослей, подчас едва достигая нескольких сантиметров высоты. Их распространение ограничено линией кустарниковых зарослей (*scrub line*).

Наиболее информативными являются верхние пределы распространения лесной растительности и отдельных деревьев. Единичные деревья, растущие на 50–100 м выше сомкнутых насаждений, угнетенные, но тем не менее плодоносящие, являются тем материалом, за счет которого начинают формироваться лесные сообщества при улучшении климатических условий [6].

Главным фактором глобальных изменений является потепление климата, наблюдающееся с 1970-х гг. Линейный тренд среднегодовой температуры за период 1976–2011 гг. составил для земного шара +0,16 °C/10 лет, для Северного полушария – +0,32 °C/10 лет, для территории РФ – +0,44 °C/10 лет. В Прибайкалье рост среднегодовой приповерхностной температуры с середины 70-х гг. характеризуется коэффициентом линей-

ного тренда $+0,38$ °C/10 лет, осредненной по сезонам: зима – $+0,13$, весна – $+0,58$, лето – $+0,56$, осень – $+0,28$ °C/10 лет. В изменении годовых сумм осадков на территории Прибайкалья также преобладает определенная тенденция к росту осадков. Коэффициент линейного тренда осредненных годовых сумм атмосферных осадков за 1976–2011 гг. – $+0,9$ мм/мес./10 лет, осредненных по сезонам: зима – $+0,5$, весна – $+0,5$, лето – $+1,5$, осень – $+1,3$ мм/мес./10 лет [5].

Анализ влияния изменений климата на динамику растительности возможен на основе временных рядов космических снимков, позволяющих выявлять изменения растительного покрова, а также экстраполировать данные наземных наблюдений на региональный и субглобальный уровни [7; 11; 19].

Наиболее испытанный, достаточно простой и универсальный метод исследований состояния и динамики растительности – расчет индексных изображений NDVI [1; 8; 9; 31] – нормализованного разностного вегетационного индекса – простого количественного показателя, коррелирующего с запасами растительной биомассы.

Для оценки величин горизонтального и вертикального сдвигов границы лесной растительности, получаемых по спутниковым данным высокого пространственного разрешения, снижения влияния случайных факторов, а также удобства пространственного моделирования в среде ГИС была использована методика, предполагающая совместное использование индекса NDVI, цифровой модели рельефа (ЦМР), данных лесоустройства и материалов проведенных экспедиционных исследований.

Материалами дистанционного зондирования являлись снимки Landsat-MSS (08.07.1975) и Landsat-5 TM (23.08.2010). Изменения растительного покрова были определены при использовании индекса NDVI, рассчитанного по космическим снимкам (рис. 2). Особенностью применения NDVI является сведение информации от многозонального изображения к единому параметру. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра ($0,6–0,7$ мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области ($0,7–1,0$ мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной.

Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять и анализировать растительные сообщества от прочих природных объектов. Использование нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и проч.

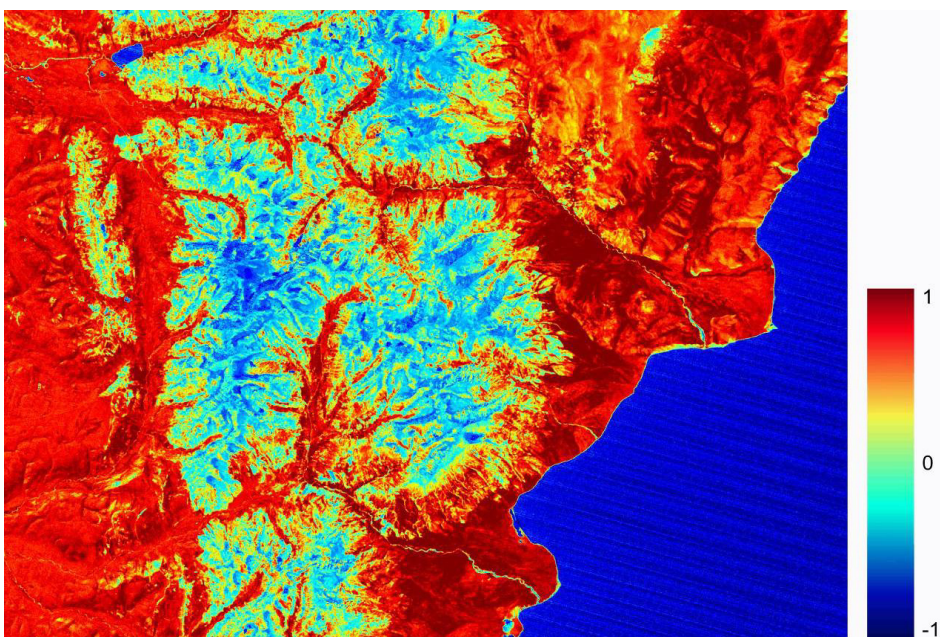


Рис. 2. Рассчитанный NDVI по космическому снимку Landsat-5 TM (23.08.2010)

В качестве ЦМР использовалась ASTER GDEM 2 (ASTER GDEM is a product of METI and NASA) (рис. 3), созданная на основе данных стереоскопической съемки в ближнем инфракрасном диапазоне со спутника Terra/ASTER. Пространственное разрешение ASTER GDEM – 1 угл. с (примерно 30 м). Система координат WGS84/EGM96.

Результаты исследования

Анализ изменения растительного покрова с использованием разно-временных космических снимков позволил выявить участки повышения значений NDVI, соответствующие увеличению густоты лесной растительности, на восточном макросклоне Байкальского хребта, обращенном к оз. Байкал. Удалось зафиксировать продвижение вертикальной границы леса вверх по склону до 20 м, горизонтальной – до 90 м (рис. 4, 5). Изменения представлены не повсеместно, а лишь на отдельных участках южной и юго-восточной экспозиций.

Вероятнее всего, это связано с повышением среднегодовой температуры и ростом годовых сумм осадков на территории Прибайкалья. Необходимо также отметить, что на склонах хребтов, обращенных к оз. Байкал, всегда выпадает большее количество осадков, зимы многоснежные, реже бывают заморозки, длиннее безморозный период.

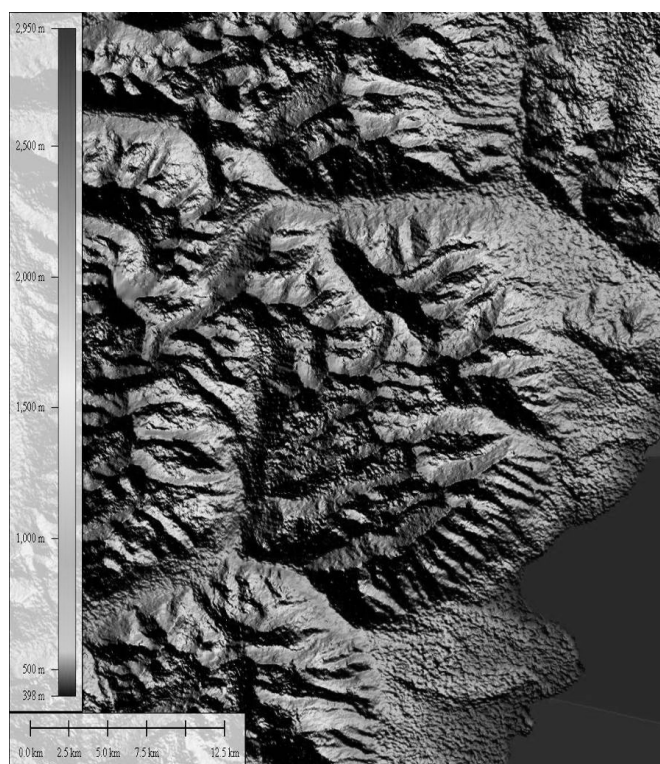


Рис. 3. Цифровая модель рельефа ASTER GDEM 2 на исследуемую территорию

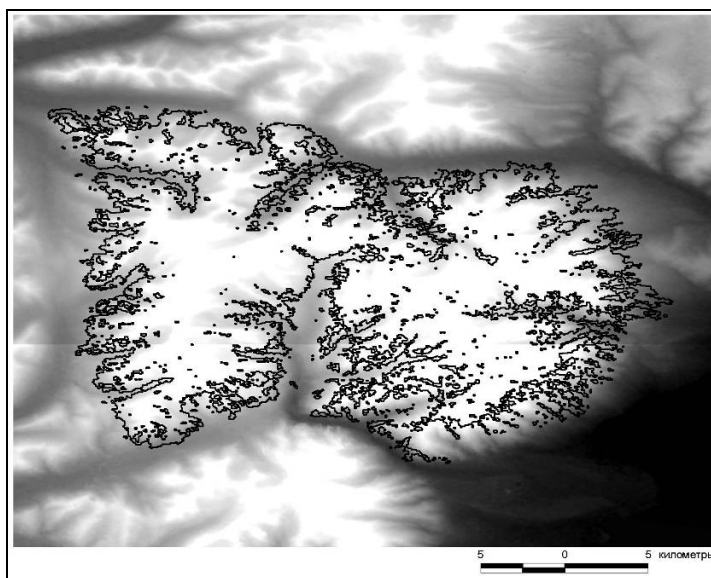


Рис. 4. Верхняя граница леса центральной части Байкальского хребта, рассчитанная по снимку Landsat 1975 г., на ЦМР ASTER GDEM 2

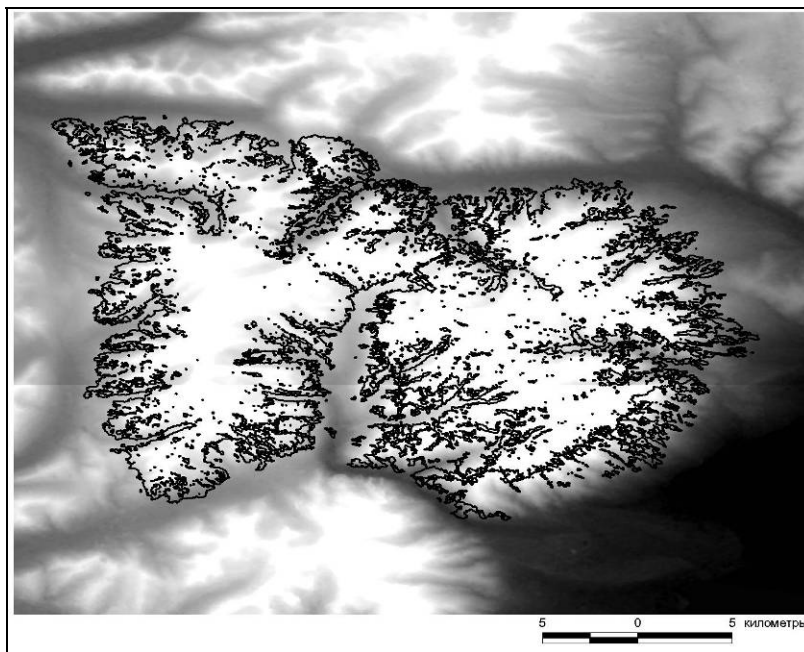


Рис. 5. Верхняя граница леса центральной части Байкальского хребта, рассчитанная по снимку Landsat 2010 г., на ЦМР ASTER GDEM 2

В абсолютных числах площадь необлесенных территорий в 1975 г. составила 377,96 км², в 2010 г. – 374,67 км². Изменение площади облесенных территорий в центральной части Байкальского хребта за 35 лет составило 0,9 %. По результатам исследования можно сделать вывод, что климатические изменения 35-летнего периода (по данным 1975–2010 гг.) – повышение температуры воздуха и увеличение количества атмосферных осадков – позволили занять лесной растительности новые местообитания, недоступные им ранее. Продвижение леса вверх по склонам Байкальского хребта произошло на отдельных участках южной и юго-восточной экспозиций восточного макросклона (рис. 6).

Заключение

Опыт исследований динамики верхней границы леса на основе наземных и дистанционных методов [2; 7; 9; 28; 31] показывает определенные методические трудности решения этой задачи по дистанционным материалам. В связи с этим требуется разработка нового методического подхода к дистанционному исследованию динамики верхней границы леса.

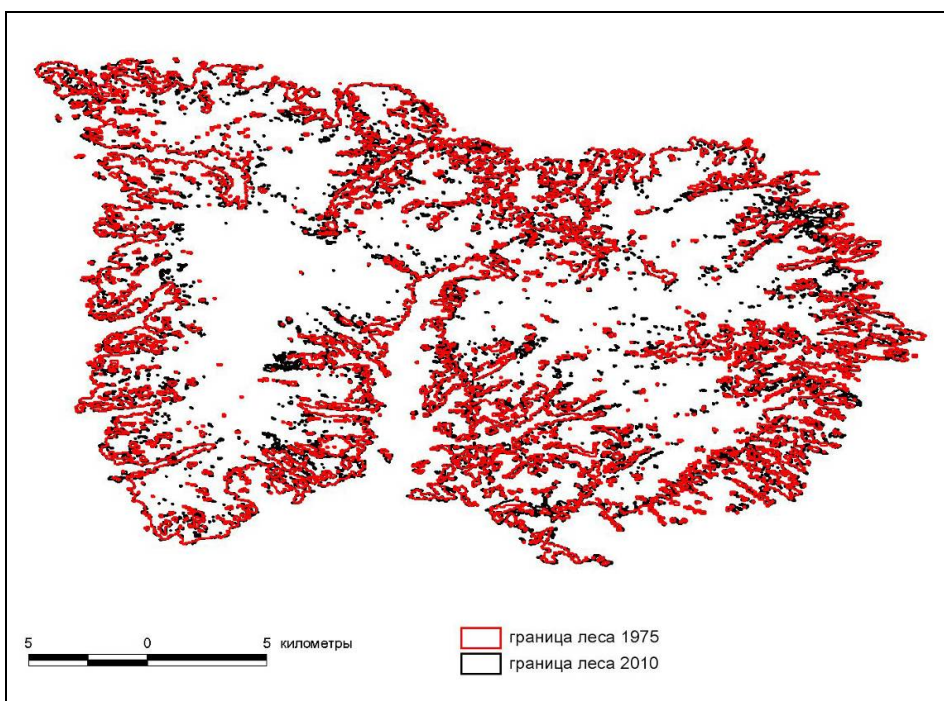


Рис. 6. Совмещение границ леса, рассчитанных по снимкам Landsat 1975 и 2010 гг.

Совместное использование разновременных космических снимков Landsat, вегетационного индекса NDVI, цифровой модели рельефа ASTER GDEM 2 позволяет проводить количественную оценку вертикального и горизонтального сдвига верхней границы леса, связанного с возможными последствиями глобального изменения климата. На основе предложенной методики получены современные данные о динамике верхней границы леса в период изменения климата, в частности выявлено продвижение верхней границы леса на Байкальском хребте за последние полвека.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта 14-45-04097 «р_сибирь_а».

Список литературы

1. Владимиров И. Н. Геоинформационное моделирование лесной растительности Северо-Западного Прибайкалья (опыт применения алгоритмов классификации геоизображений) // Геодезия и картография. – 2012. – № 9. – С. 30–35.
2. Владимиров И. Н. Динамика верхней границы леса на Байкальском хребте / И. Н. Владимиров // Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии : материалы Междунар. науч. конф. – Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2012. – Т. 2. – С. 232–234.

3. Структура растительного покрова западной части Верхнеангарской котловины // И. Н. Владимиров [и др.] / География и природные ресурсы. – 2014. – № 2. – С. 44–53.
4. Высокогорная флора Станового нагорья: состав, особенности и генезис / Н. С. Водопьянова [и др.] ; отв. ред. Л. И. Малышев. – Новосибирск : Наука, 1972. – 272 с.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2011 г. – М. : НИУ Росгидромета, 2012. – 83 с.
6. Зибзеев Е. Г. Структура экотона между лесным и высокогорным поясами гор Южной Сибири / Е. Г. Зибзеев, В. П. Седельников // Растит. мир Азиатской России. – 2010. – № 2. – С. 46–49.
7. Кравцова В. И. Методические подходы к исследованию динамики северной границы лесов по аэрокосмическим снимкам // ИнтерКарто/ИнтерГИС-17: Устойчивое развитие территории: теория ГИС и практический опыт : материалы Междунар. науч. конф., Белокуриха (Россия), Денпасар (Индонезия), 4–19 дек. 2011 г. – Барнаул, 2011. – С. 103–109.
8. Кузьменко Е. И. Использование ландшафтной карты для оценки продуктивности геосистем южной тайги Западной Сибири / Е. И. Кузьменко, Ш. Максюттов, И. Н. Владимиров // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – С. 143–151.
9. Лошкарева А. Р. Изучение динамики лесотундровой растительности по космическим снимкам (на примере Кольского полуострова) // ИнтерКарто/ИнтерГИС-17: Устойчивое развитие территории: теория ГИС и практический опыт : материалы Междунар. науч. конф., Белокуриха (Россия), Денпасар (Индонезия), 4–19 декабря 2011 г. – Барнаул, 2011. – С. 120–126.
10. Фомин В. В. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале во второй половине XX в. / В. В. Фомин [и др.] // Геоинформатика. – 2007. – № 1. – С. 56–61.
11. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры / В. И. Харук [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2004. – Т. 398, № 3. – С. 404–408.
12. 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.
13. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале / С. Г. Шиятов [и др.] // Экология. – 2007. – № 4. – С. 243–248.
14. Шиятов С. Г. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале / С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа // Лесоведение. – 2007. – № 6. – С. 11–22.
15. Arno S. F. Timberline: Mountain and Arctic forest frontiers / S. F. Arno, R. P. Hammerly. – Seattle, WA, USA : The Mountaineers, 1984. – 304 p.
16. Cwynar L. C. Reversion of forest to tundra in the central Yukon / L. C. Cwynar, R. W. Spear // Ecology. – 1991. – Vol. 72. – P. 202–212.
17. Detection of vegetation change using reconnaissance imagery / H. H. Shugart [et al.] // Global Change Biology. – 2001. – Vol. 7, №3. – P. 247–252.
18. Ecological responses to recent climate change / G-R. Walter [et al.] // Nature. – 2002. – Vol. 416. – P. 389–395.
19. How can the dynamics of the tundra-taiga boundary be remotely monitored? / G. Rees [et al.] // AMBIO Special report. – 2002. – Vol. 12. – P. 56–62.

20. Jakubos B. Invasion of subalpine meadows by lodgepole pine in Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A. / B. Jakubos, W. H. Romme // *Arctic and Alpine Research*. – 1993. – Vol. 25, N 4. – P. 382–390.
21. Kearney M. S. Recent seedling establishment at timberline in Jasper National Park, Alberta // *Canadian Journal of Botany*. – 1982. – Vol. 60. – P. 2282–2287.
22. Kullman L. Neoglacial climate control of subarctic *Picea abies* stand dynamics and range limit in Northern Sweden / L. Kullman, O. Engelman // *Arctic and Alpine Research*. – 1997. – Vol. 29, N 3. – P. 315–326.
23. Kullman L. Post-little ice age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective / L. Kullman, L. Öberg // *Journal of Ecology*. – 2009. – Vol. 97, N 3. – P. 415–429.
24. Kullman L. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes / L. Kullman // *Journal of Ecology*. – 2002. – Vol. 90, N 1. – P. 68–77.
25. Kullman L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for tree line theory and climate change ecology // *Journal of Ecology*. – 2007. – Vol. 95, N 1. – P. 41–52.
26. Lavoie C. Black spruce growth forms as a records of a changing winter environment at treeline, Quebec, Canada / C. Lavoie, S. Paeytte // *Arctic and Alpine Research*. – 1992. – Vol. 24, N 1. – P. 40–49.
27. Lloyd A. H. Holocene dynamic of treeline forests in the Sierra Nevada / A. H. Lloyd, L. J. Graumlich // *Ecology*. – 1997. – Vol. 78, N 74. – P. 1199–1210.
28. Modeling environmental niche of Himalayan birch and remote sensing based vicarious validation / C.P. Singh [et al.] // *Tropical Ecology*. – 2013. – Vol. 54, N 3. – P. 319–327.
29. Smith W. K. *Alpine Forest* / W. K. Smith, D. M. Johnson, K. Reinhardt // *Ecosystem Ecology* / ed. S. E. Jørgensen. – Amsterdam, Netherlands : Elsevier B. V., 2009 – P. 156–165.
30. Taylor A. H. Forest expansion and climate change in the mountain hemlock (*Tsuga mertensiana*) zone, Lassen Volcanic National Park, California, USA // *Arctic and Alpine Research*. – 1995. – Vol. 27. № 3. – P. 207–216.
31. The Upward migration of alpine vegetation as an indicator of climate change: observations for Indian Himalayan region using remote sensing data / S. Panigrahy [et al.] // *NNRMS Bulletin*. – 2010. – Vol. 35. – P. 73–80.
32. Tranquillini W. *Physiological ecology of the Alpine timberline: Tree existence at high altitudes with special reference to the European Alps (Ecological Studies, 31)* / W. Tranquillini. – Berlin ; N. Y. : Springer-Verlag, 1979. – 137 p.
33. Wardle P. Evidence for rising upper limits of four native New Zealand forest trees / P. Wardle, M. C. Coleman // *New Zealand Journal of Botany*. – 1992. – Vol. 30, N 3. – P. 303–314.
34. Weisberg P. J. Spatial variation in tree regeneration in the forest-tundra ecotone, Rocky Mountain National Park, Colorado / P. J. Weisberg, W. L. Baker // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1995. – Vol. 25 (8). – P. 1326–1339.
35. Woodward A. Climate, geography, and tree establishment in subalpine meadows of the Olympic Mountains, Washington, USA / A. Woodward, E. G. Schreiner, D. G. Silsbee // *Arctic and Alpine Research*. – 1995. – Vol. 27, N 3. – P. 217–225.

Dynamics of the timberline at the Baikal range

I. N. Vladimirov

Abstract. We developed and implemented a method for determining long-term changes to the timberline. Sharing multitemporal satellite images Landsat, NDVI, digital elevation model ASTER GDEM 2 allows to quantify the vertical and horizontal displacement of timberline associated with the possible consequences of global warming. On the basis of the proposed method obtained current data on the dynamics of changes to the timberline on the Baikal mountains over the past half-century

Keywords: dynamics, timberline, NDVI, digital elevation model (DEM), Baikal range.

*Владимиров Игорь Николаевич
кандидат географических наук
заместитель директора по научной работе
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1
тел.: (3952) 42-78-20*

*Vladimirov Igor Nikolaevich
Candidate of Sciences (Geography)
Deputy Director
V. B. Sochava Institute of Geography
SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-78-20*