

УДК 574.34

**АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ
ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ
ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НАЗЕМНОГО ФОТОМОНИТОРИНГА**

© А.П. Михайлович, В.В. Фомин

Приведены результаты анализа однократных и повторных ландшафтных фотографий, полученных в ходе создания системы наземного экологического фотомониторинга в нижнем течении рек Енгию и Кердоманшор (горный массив Рай-Из, Полярный Урал) за период с 1960 по 2016 годы. Анализ фотоснимков проводился на предмет определения характерных эффектов, обусловленных влиянием ведущих экологических факторов на древесную растительность, и особенностей условий ее местопроизрастания.

Ключевые слова: метод наземного фотомониторинга, однократные и повторные ландшафтные фотографии, ведущие экологические факторы, древесная растительность, Полярный Урал, Россия.

Исследования пространственно-временной динамики лесотундровых сообществ в экотоне верхней границы древесной растительности в нижнем течении рек Енгию и Кердоманшор (горный массив Рай-Из, Полярный Урал) под руководством и с участием проф. С. Г. Шиятова проводятся с 1960 года до настоящего времени. За этот период было проведено фотографирование ландшафтов района исследований с более чем восьмью сотнями точек фотосъемки. Архив фотографий состоит из нескольких тысяч единиц.

Ландшафтные фотографии широко используются в экологических исследованиях, как правило, в качестве иллюстраций исследуемых объектов или процессов. Проведение их автоматизированного анализа для получения количественных характеристик объектов или процессов, в случае использования повторных фотографий, затруднено [1, 2]. Сложность их обработки и анализа обусловлены следующими причинами: изменение масштаба в пределах снимка; разнообразие объектов, отображаемых на фотографии; неоднородность условий освещения объектов, как в пределах одного снимка, так и для снимков, полученных в разные моменты времени; различия в качестве фотоснимков, обусловленных различиями в качестве фотоаппаратуры и технологий изготовления снимков.

Необходимо также отметить еще одну особенность ландшафтных фотографий. На снимке отображается относительно небольшой фрагмент

окружающего исследователя пространства. При наличии нескольких фотографий даже одного и того же участка местности, но полученного с разных точек фотосъемки и, соответственно, с разными направлениями оптической оси фотоаппарата, очень трудно идентифицировать исследуемый участок без информации о месте и направлении фотографирования. Данная проблема обозначена нами, как проблема целостного формирования представления исследуемого пространства по фотографиям наблюдателем.

Для решения ряда описанных выше проблем разработана методика обработки и анализа ландшафтных фотографий [2]. Суть данной методики состоит в особой форме сопряжения ландшафтного снимка и геоинформационных слоев, характеризующих поверхность исследуемого района и действие ведущих экологических факторов, в пределах области видимости из точки фотосъемки. Такая форма сопряжения пространственных данных (фотографий и слоев) позволяет соотнести со снимком ряд дополнительных качественных и количественных характеристик геоинформационных слоев. Например, ландшафтный снимок можно аннотировать следующими показателями, полученными с использованием геоинформационных функций и моделей: экспозиция склона; значение крутизны склона; количество поступающей за определенных период времени солнечной радиации и ряд других. Кроме того, она позволяет переносить информацию со снимка на карту [2].

МИХАЙЛОВИЧ Анна Павловна, Уральский федеральный университет, e-mail: anna.mikhailovich@gmail.com
ФОМИН Валерий Владимирович – д.б.н., Уральский государственный лесотехнический университет, e-mail: fomval@gmail.com



а



б



в



г



д



е

Рис. Ландшафтные фотографии, сделанные в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале (горный массив Рай-Из): а – флагообразная крона, сформированная в результате воздействия ветра и снега (снеговая коррозия); б – фотография участка, на котором не растаял снег (дата снимка 19 июля 2017 года); в – воздействие ветра на деревья (наклон древесного остатка, погибшего в ходе Малого ледникового периода, наклон современных деревьев и направление упавшего под воздействием ветра дерева свидетельствуют о сохранении одного и того же направления преобладающих ветров в данной части района исследований в течение нескольких столетий); г – появление молодого поколения лиственницы сибирской на ранее необлесенном участке; д – остатки деревьев, погибших в ходе Малого ледникового периода; е – ель сибирская, нетипичный для данных лесорастительных условий вид, редко встречается в нижней части экотона

Следует отметить, что феномен графического образа состоит в том, что количество объектов или явлений, которые можно обнаружить на нем, как правило, значительно превышает количество элементов, его составляющих. Кроме того, информация, которую можно получить с помощью ландшафтной фотографии, которая является графическим образом, будет зависеть от того, специалист какой предметной области ее изучает.

При использовании ландшафтных фотографий в качестве источника информации о древесной растительности, произрастающей на верхнем и северной пределе, необходимо понять, какая информация может быть получена исследователем и, возможно, перенесена на карту. Для решения этого вопроса был проведен анализ архива однократных и повторных фотографий на предмет описания условий местопроизрастания древесной растительности и определения характерных эффектов, выражающихся в особенностях ее морфологического строения и пространственного размещения.

Анализ архива ландшафтных фотографий позволил установить, что с их помощью возможно определение ряда феноменов перечисленных ниже (фотографии некоторых из них приведены на рис.):

1) направление преобладающих ветров по флагообразности крон деревьев, образующихся в результате снеговой корразии, и наклону стволов или направлению в котором лежат, сваленные ветром деревья или древесные остатки;

2) участки, на которых накапливается и долго сходит снеговой покров (наличие снежников в середине или даже конце вегетационного периода; наличие вогнутых областей с характерной серобурой окраской растительности и/или отсутствием у растений зеленых листьев или хвои; очищенные от сучьев и ветвей (на высоту до 6 м) стволы взрослых деревьев лиственницы сибирской);

3) наличие естественного возобновления, его обильность и жизнеспособность;

4) определение местоположения нетипичных для данных лесорастительных условий видов древесной растительности;

5) определение мест, где ранее произрастала древесная растительность по древесным остаткам;

6) выявление областей, на которых был разрушен почвенный покров в результате гибели деревьев в ходе Малого ледникового периода,

7) выявление ряда характерных для района исследований отдельных элементов почвенного покрова и особенностей почвообразовательного процесса (бугры пучения с формированием по их краям субстрата, пригодного для произрастания древесной и кустарниковой растительности; каменистые россыпи, их примерный состав);

8) определение видового состава кустарникового яруса, живого напочвенного покрова.

9) определение мест катастрофических воздействий на древесную растительность (ветровал, уничтожение деревьев ударом молнии, повреждение или уничтожение деревьев, произрастающих на припойменных террасах в результате ледяных заторов, разрушение почвенного покрова надпойменных террас в результате схода льда);

10) антропогенные воздействия (пылевое загрязнение вблизи дорог, вырубка отдельных деревьев оленеводами).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-04-05857).

Литература

1. Фомин В.В., Михайлович А.П. Экологический фотомониторинг естественных и антропогенных ландшафтов // *Аграрный вестник Урала*. 2013. № 11, С.16-21.
2. Фомин В.В., Михайлович А.П., Шиятов С.Г. Новые подходы к изучению динамики древесной растительности с использованием разновременных ландшафтных фотоснимков (на примере Полярного Урала) // *Экология*. 2015. №5. С.323-321.

ANALYSIS OF SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF WOODY VEGETATION ON THE POLAR URAL IN THE SECOND HALF OF THE XX – EARLY XXI CENTURIES WITH THE USE OF THE GROUND-BASED PHOTOMONITORING METHOD

© A.P. Mikhailovich, V.V. Fomin

The results of the analysis of single and repeated landscape photographs obtained in the areas close to downstream of the Yengaiu and Kerdomanshor rivers (mountain massif Rai-Iz, Polar Urals, Russia) from 1960 to 2016 were described. Analysis of photographs was conducted to determine the specific effects due to the impact of main ecological factors on woody vegetation, and the peculiarities of the forest-tundra site conditions.

Keywords: ground based photo-monitoring method, single and repeated landscape photographs, main ecological factors, woody vegetations, Polar Urals, Russia.

УДК 574.34

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ В ЭКОТОНЕ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ

© А.П. Михайлович, В.В. Фомин

Разработана методика автоматизированного поиска границ между группами точечных объектов с известными координатами. Представлены результаты применения методики для определения границ между различными типами лесотундровых сообществ. В качестве точечных объектов использовались деревья, координаты которых получены в результате дешифрирования данных дистанционного зондирования. Методика позволяет повысить объективность определения местоположения границ. Приведено описание закономерностей пространственного распределения деревьев в экотоне верхней границы древесной растительности на основе обработки и анализа аэро- и космоснимков высокого пространственного разрешения 1962, 1964, 1985, 2003 и 2015 годов.

Ключевые слова: пространственно-временная динамика, граница лесотундровых сообществ, методика, Полярный Урал.

Деревья на верхнем и северном пределе их произрастания очень чувствительны к изменению климата. Поэтому мониторинг реакции древесной растительности на региональное изменение климата проводится в высокогорных и высокоширотных районах [1]. Для повышения объективности результатов анализа пространственно-временной динамики деревьев требуется как совершенствование уже существующих методик, так и разработка новых методических подходов к количественной оценке изменений, которые происходят в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГДР).

Аэро- и космоснимки высокого пространственного разрешения позволяют определить местоположение отдельных деревьев. При наличии снимков, полученных в разные годы, становится возможным создание векторных точечных геоинформационных слоев, дающих представление о пространственном распределении деревьев в ЭВГДР в разные годы. Кроме того, возможность определения местоположения границ между разными типами лесотундровых сообществ (типами ценохор) позволяет получить данные об изменении пространственного положения и конфигурации участков, относящихся к разным типам сообществ. Предложенная оригинальная методика, примеренная к решению этой задачи, позволяет определить местоположение границ между следующими ценохорами: одиночные деревья в тундре, редина, редколесье и лес. Данные типы лесотундровых сообществ, а также количественные критерии, ис-

пользуемые для их выделения, приведены в работе С.Г. Шиятова с соавторами [1]: среднее расстояние между деревьями или густота деревьев.

В качестве источника данных используется векторный точечный геоинформационный слой, каждая точка которого характеризует местоположение дерева. В основе методики выделения границ между группами точечных объектов лежит разработанный авторами оригинальный алгоритм, состоящий из следующих этапов:

- 1) создание слоя полигонов Вороного на основе векторного точечного слоя;
- 2) определение диапазонов значений площади полигонов Вороного, соответствующих каждому типу лесотундрового сообщества, создание слоев, в каждом из которых содержатся полигоны, отнесенные к одному из четырех типов ценохор;
- 3) объединение ячеек в полигоны путем удаления внутренних границ; для каждого слоя, полученного на втором этапе;
- 4) удаление из слоя, полученного на этапе 3, полигонов, площадь которых меньше заданного значения;
- 5) выделение полигонов Вороного в слое определенного типа лесотундрового сообщества, например, «редколесье», граничащих с полигонами слоя «соседнего» типа лесотундрового сообщества, например, «лес»;
- 6) выделение границы – линии, образованной общими сторонами граничащих полигонов (см. этап 5) двух типов лесотундровых сообществ;

МИХАЙЛОВИЧ Анна Павловна, Уральский федеральный университет, e-mail: anna.mikhailovich@gmail.com
ФОМИН Валерий Владимирович – д.б.н., Уральский государственный лесотехнический университет, e-mail: fomval@gmail.com

7) определение местоположение деревьев границы – выделение точек, соответствующих полигонам Вороного, описанным на этапе 5.

На рисунке приведены картосхемы, иллюстрирующие этапы реализации данного алгоритма.

В результате дешифрирования аэро- и космоснимков высокого пространственного разрешения 1962, 1964, 1985, 2003 и 2015 годов района исследований, который находится в нижнем течении рек Енгаю и Кердоманшор (горный массив Рай-Из, Полярный Урал, Россия), были созданы точечные векторные геоинформационные слои, характеризующие местоположение деревьев лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в указанные выше годы. Данный район характеризуется сложным рельефом, который сформировался в результате продвижения и таяния ледника в ходе последнего глобального оледенения. Необходимо также отметить, что на некоторых необлесенных в настоящее время участках тундры ранее произрастала древесная растительность, но она погибла в ходе похолодания, которое происходило в XIV-XIX вв. (Малый ледниковый период). Об этом свидетельствует большое количество относительно хорошо сохранившихся древесных остатков.

Сравнительный анализ пространственных данных, полученных в результате дешифрирования аэро- и космоснимков, свидетельствуют об увеличении (примерно в четыре раза) количества деревьев на исследуемой территории в период с 1962 по 2015 год. Установлен факт появления современной древесной растительности на необлесенных участках тундры.

С использованием описанной выше методики выделения границ между лесотундровыми сообществами на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования были созданы векторные линейные геоинформационные слои со следующими границами «отдельные деревья в тундре»-«редина», «редина»-«редколесье» и «редколесье»-«лес» для 1962-1964, 1985, 2003 и 2015 года. Первая и третья границы являются границами экотона, а вторую границу можно рассматривать как границу между двумя фитоценозами: лес и тундра.

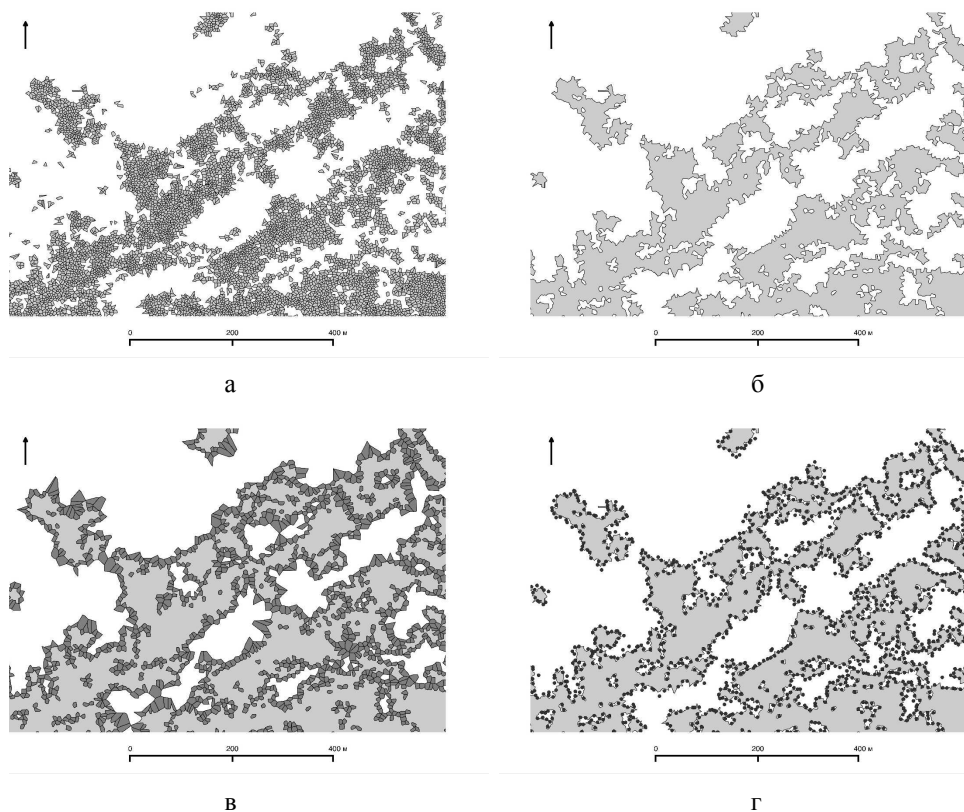


Рис. Картосхемы, иллюстрирующие этапы алгоритма выделения границ между разными типами лесотундровых сообществ: а – полигоны Вороного, созданные на основе точечного слоя деревьев и отнесение каждого из них к одному из типов сообществ; б – слой после объединения полигонов Вороного и их фильтрации по пороговому значению площади полигона; в – выделение полигонов, относящихся к разным типам лесотундровых сообществ; г – выделение деревьев границы

Сравнительный анализ по годам слоев одного типа границ позволил оценить изменение их конфигурации и положения в пространстве. Необходимо отметить, что в условиях низкого уровня внутривидовой конкуренции в ЭВГДР вероятность появления и выживания молодого поколения лиственницы на ранее необлесенных участках будет ниже, чем на участках, на которых уже произрастает древесная растительность. Это связано с наличием семян, качеством семенного материала и формированием благоприятных условий, обусловленных влиянием древесной растительности (фитогенное поле) для появления молодого поколения деревьев [2]. Из вышеописанного следует, что величины линейного и вертикального сдвигов границ между разными типами лесотундровых сообществ должны существенно отличаться друг от друга. Данный факт необходимо учитывать при проведении сравнительного анализа сдвига границ.

Наиболее подходящей, на наш взгляд, для оценки величины и скорости вертикального и горизонтального сдвигов верхней границы древесной растительности является граница «редина-редколесье», которая проходит внутри экотона. Изменение ее пространственного положения и конфигурации менее чувствительно к появлению новых деревьев, по сравнению с границей «отдельные деревья в тундре-редина». Оценка сдвига границы «редина-лес» в ряде случаев невозможна в связи с отсутствием этой границы на в определенные годы, когда лесное сообщество еще не сформировалось.

К особому следует также отнести случаи, когда в определенный момент времени размеры лесных участков являются небольшими по площади (до одной-двух тысяч квадратных метров), при этом вокруг них находятся участки редколесий, площадь которых на порядок или порядки превышает площадь, занимаемых лесными сообществами. Например, в 1962-1964 году лесное сообщество сформировалось на нескольких небольших участках, расположенных в одной части экотона, протяженность которого несколько километров.

В пределах ЭВГДР находились большие по площади участки редколесий. Позже к 2003 году на многих из них увеличилась густота деревьев и сомкнутость крон, поэтому их отнесли к лесным сообществам. При проведении сравнительного анализа пространственного положения границы за период с начала шестидесятых годов до начала двухтысячных установлено значительное изменение ее пространственного положения. В описанном выше случае корректная оценка величины горизонтального и вертикального сдвига этой границы будет затруднена. Например, при расчете линейного сдвига с использованием методики, описанной в работе [3], будут получены завышенные оценки сдвига границы, только из-за того, что лесные участки были в одной части экотона, протяженность которого несколько километров, а граница сомкнутого леса появилась на другой его части.

Приведенные выше особенности анализа пространственно-временной динамики деревьев в экотоне верхней границы древесной растительности с использованием границ между разными типами лесотундровых сообществ должны учитывать особенности процессов их формирования: появление деревьев на ранее необлесенных участках тундры или увеличение густоты деревьев и сомкнутости крон на участках, где уже растут деревья.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-04-05857).

Литература

1. Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. 2005. № 2. С.1-8.
2. Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука. 1985. 208 с.
3. Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В., Циммерманн Н.Е. Вертикальный и горизонтальный сдвиги верхней границы редколесий и сомкнутых лесов в XX столетии на Полярном Урале // Экология. 2007. № 4. С.243-248.

SPATIAL PATTERNS OF TREE DISTRIBUTION IN THE UPPER TREE LINE ECOTONE ON THE POLAR URALS IN THE SECOND HALF OF XX – EARLY XXI CENTURIES

© А.П. Mikhailovich, V.V. Fomin

Method of automated boundaries revealing between groups of point objects was developed. It allows a researcher to increase the objectivity of finding boundaries between forest-tundra communities, on the basis of trees coordinates, obtained as a result of remote sensing data processing. The spatial patterns of trees distribution in the upper tree line ecotone defined on the basis of processing and analysis of high spatial resolution aerial and satellite images obtained in 1962, 1964, 1985, 2003 and 2015 years were described.

Keywords: spatio-temporal dynamics, boundary of forest-tundra communities, method, Polar Urals.