

УДК 574.34+574.42+004.932.2

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ДИНАМИКИ ВЫСОКОГОРНОЙ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОВРЕМЕННЫХ ЛАНДШАФТНЫХ ФОТОСНИМКОВ (НА ПРИМЕРЕ ПОЛЯРНОГО УРАЛА)

© 2015 г. В. В. Фомин*, А. П. Михайлович**, С. Г. Шиятов***

*Уральский государственный лесотехнический университет
620100 Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
e-mail: fomval@gmail.com

**Уральский федеральный университет (УрФУ)
620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
e-mail: anna.mikhailovich@gmail.com

***Институт экологии растений и животных УрО РАН
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202
e-mail: stepan@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 22.01.2015 г.

Приведено описание методики анализа и представления повторных ландшафтных фотоснимков для оценки пространственно-временной динамики редкостойных древостоев, произрастающих в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале (горный массив Рай-Из). Она направлена на решение следующих проблем использования повторных ландшафтных фотографий: формирование у исследователя целостного представления изучаемого пространства; получение дополнительных данных о местности, создание и пополнение текстовых описаний к ландшафтными снимкам, а также создание тематических карт или картосхем с использованием повторных ландшафтных фотоснимков.

Ключевые слова: повторные ландшафтные фотоснимки, экотон верхней границы древесной растительности, пространственно-временная динамика, условные знаки, картосхема, Полярный Урал.

DOI: 10.7868/S0367059715050091

Ландшафтные аналоговые фотоснимки и цифровые изображения — это вместительные и относительно дешевые хранилища большого объема информации (Dahdouh-Guebas, Koedam, 2008). Они являются объективным источником данных о местности и обладают высокой степенью наглядности. В последние годы повторные ландшафтные снимки достаточно широко используются в экологии и лесном хозяйстве для оценки изменений, которые происходят за определенный период времени на уровне ландшафтов, сообществ, популяций и организмов (Hall, 2001; Нестеров, Сарычев, 2006; Сарычев, 2006; Фомин и др., 2007, 2008а; Шиятов, 2009; Hendrick, Copenheadver, 2009; Webb, Boyer, Turner, 2010; Фомин, Михайлович, 2011).

Системное использование повторных ландшафтных фотоснимков в геологических и геоэкологических исследованиях началось в конце XIX—начале XX вв. (Hall, 2001; Сарычев, Несте-

ров, 2007). Анализ литературных данных позволяет утверждать, что популярность метода наземного фотомониторинга (МНФМ) при проведении экологических исследований неуклонно возрастает (Hall, 2001; Hendrick, Copenheadver, 2009; Webb et al., 2010). Однако он имеет ряд существенных недостатков, которые ограничивают его более широкое использование (Фомин и др., 2008б; Фомин, Михайлович, 2013).

Один из них обусловлен особенностью представления информации об окружающем пространстве с помощью фотоснимков. На фотоснимке отображается только фрагмент ландшафта, который виден с точки фотосъемки в определенном направлении. Этот же участок местности на снимке, полученном из другой точки с другим направлением оптической оси фотоаппарата, может быть трудно узнаваем. Эта особенность наземных изображений не способствует формированию у исследователя целостного пред-

ставления об изучаемой территории, что препятствует получению им интегральных оценок изменений на всем исследуемом пространстве.

Данное ограничение усугубляется тем, что достаточно часто в качестве первичного материала на начальном этапе создания системы наземного фотомониторинга конкретного района исследований используются фотографии из архивов ученых, туристов и фотографов-любителей. Как правило, при фотографировании ландшафтов они не ставили задачу создать сеть наземного фотомониторинга, а фотосъемка рассматривалась как второстепенная задача. До недавнего времени эти недостатки усугублялись ограничениями на возможность получения большого количества аналоговых фотоснимков.

Трудности автоматизированного анализа ландшафтных снимков для получения количественных характеристик объектов обусловлены изменением масштаба в пределах снимка, большим разнообразием объектов и вариантов освещенности.

Обобщая все перечисленное выше, можно выделить несколько проблем при работе с ландшафтными снимками:

- формирование у исследователя (пользователя) целостного представления изучаемого района в виде серии взаимосвязанных ландшафтных снимков;
- получение дополнительных данных о местности, изображенной на фотоснимке, а также создание и пополнение текстовых описаний и аннотаций к ландшафтным снимкам;
- создание тематических карт или картосхем с использованием повторных ландшафтных фотоснимков;
- получение количественных характеристик снимков и объектов, отображенных на них, с использованием автоматизированных алгоритмов обработки и анализа изображений.

Цель настоящей работы – описание разработанного подхода к изучению динамики высокогорной древесной растительности с использованием разновременных ландшафтных фотоснимков для решения описанных выше проблем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе были использованы повторные ландшафтные фотоснимки из архива С.Г. Шиятова, которые были сделаны за период времени с 1962 по 2004 г. на территории Полярно-уральского мониторингового полигона (горный массив Рай-Из, Полярный Урал, Россия). Подробная характеристика исследуемого участка местности описана ранее (Шиятов и др., 2005; Фомин, 2009). Объект исследований – редкостойные лиственничные древостои (*Larix sibirica*

Ledeb.), произрастающие в экотоне верхней границы древесной растительности (ЭВГДР).

На рис. 1 приведены три пары повторных фотографий, сделанных с точек фотосъемки с номерами 54, 247 и 248. На этих изображениях можно видеть юго-восточный мезосклон горного массива Рай-Из в 1962, 1977 и 2004 гг. соответственно. Эти фотоснимки наглядно иллюстрируют проблему формирования у исследователя целостного представления изучаемого района по ландшафтными фотоснимкам. По этим снимкам трудно определить, что на них может быть отображен один и тот же участок местности. Картосхема, приведенная на рис. 2, позволяет разобраться с местоположением точек и направлением фотосъемки. На данном рисунке участки местности, отображенные на снимках, представлены в виде секторов с областями видимости. Ниже приведено описание методики их создания.

С использованием цифровой модели рельефа района исследований в ГИС ARC/INFO и Arc-View GIS (ESRI Inc., США) для каждого фотоснимка были созданы векторные полигональные слои – секторы. В каждом секторе две его границы соответствуют правой и левой сторонам изображения (прямые линии идут от точки фотосъемки), а третья линия – граница района исследований.

С использованием цифровой модели рельефа и функций анализа видимости в ГИС ARC/INFO были рассчитаны растровые слои с областями видимости участков местности из точек фотосъемки. С помощью этих растров и секторов, созданных на предыдущем этапе работ, были получены полигональные слои с областями видимости в пределах каждого сектора. Участки, которые находятся на большом расстоянии от точки фотосъемки и на которых невозможно различить древесную растительность, были удалены из полигональных слоев. Таким образом, каждой паре фотографий, сделанных с одной и той же точки фотосъемки, с одним и тем же направлением оптической оси фотоаппарата, ставился в соответствие полигональный слой – сектор видимости.

При проведении наземного фотомониторинга фотографирование ландшафтов с использованием фотоаппаратуры с различными характеристиками – типичная ситуация. Это означает, что размеры областей, отображаемых на снимках, будут отличаться. Различие может выражаться, например, в величине угла секторов видимости для каждого снимка, в вершине которого находится точка фотосъемки. Если величина этого расхождения незначительна, то ею можно пренебречь, и повторные фотографии представлять одним сектором видимости большего размера. Если отличия значительны, то существует возможность обрезать часть снимка с большей шириной. Однако, на наш взгляд, следует стараться избегать данной

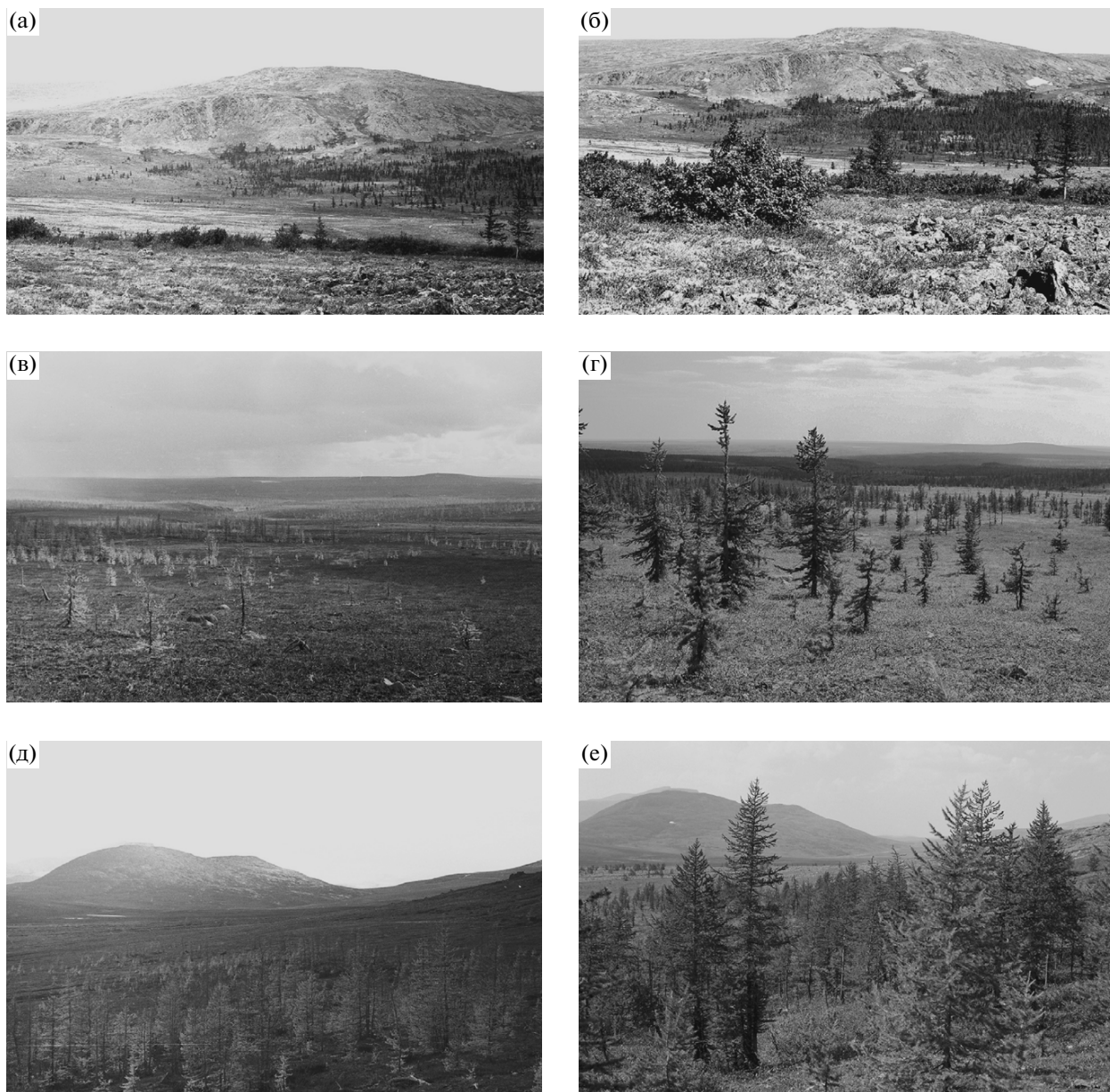


Рис. 1. Горный массив Рай-Из и прилегающая к нему территория:

а, б — юго-восточный мезосклон массива Рай-Из в 1962 и 2004 гг. соответственно (снимки сделаны с точки фотосъемки номер 54); вид на нижнюю часть с. в 1960 (в) и 2004 гг. (г) юго-восточного мезосклона массива Рай-Из с точки фотосъемки № 247 в юго-восточном направлении в 1977 (д) и 2004 гг. (е); вид с юго-восточного мезосклона массива Рай-Из в юго-западном направлении с точки № 248.

процедуры, так как в этом случае безвозвратно могут быть потеряны данные на обрезаемой части снимка.

Соотнесение объекта на изображении и его местоположения на карте достаточно трудоемкий процесс. Облегчить его помогает разбиение области фотоснимка вертикальными линиями с заданным шагом. В данной работе был выбран шаг, равный 10% от ширины большего снимка. Вертикальным линиям на фотоснимке соответствуют лучи, исходящие из точки фотосъемки и разбива-

ющие сектор видимости на более мелкие секторы. Шаг между лучами — 10% от величины угла сектора.

Источником дополнительных данных, которые могут быть использованы при проведении сравнительного анализа фотоснимков и составления текстовых описаний, являются геоинформационные слои, которые получены в результате применения функций и моделей географических информационных систем. В данном исследовании были использованы следующие функции и

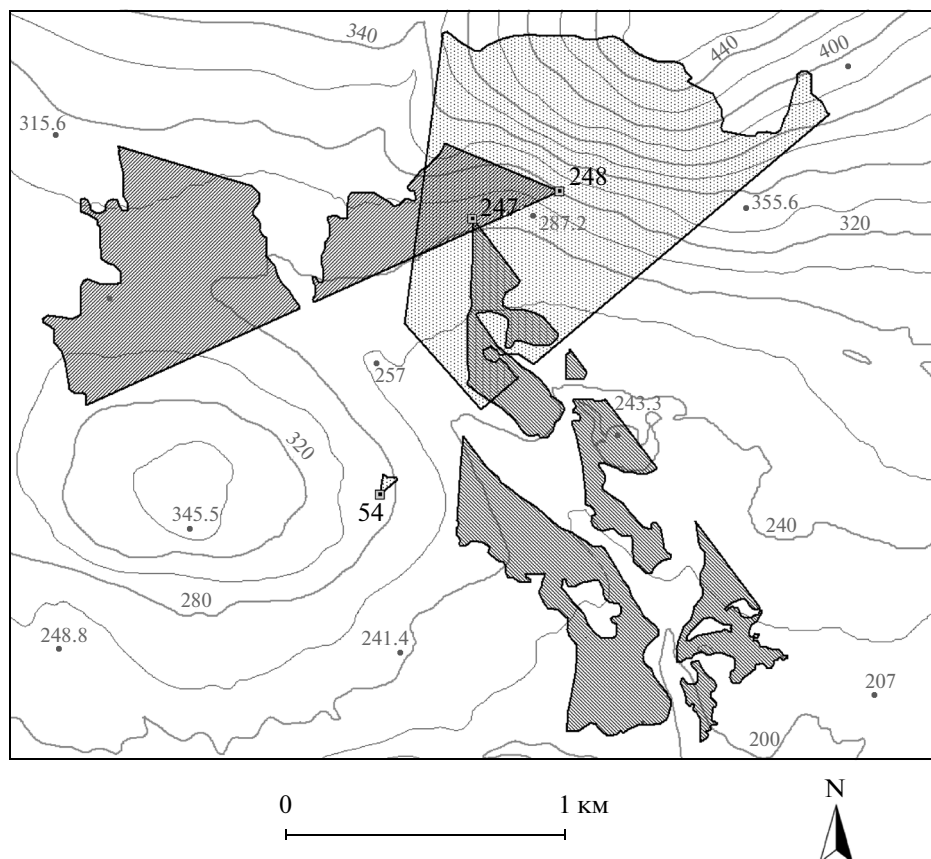


Рис. 2. Секторы с областями видимости с точек фотосъемки № 54, 247 и 248.

модели ГИС ARC/INFO: расчет величины крутизны склона, экспозиция склона, буферное расстояние для создания слоя с концентрическими областями заданного расстояния от точки фотосъемки; модель расчета топографического индекса влажности (Evans, 2003).

В качестве исходных данных для анализа, моделирования и визуального анализа были взяты следующие геоинформационные слои: цифровая модель рельефа (растровый слой с пространственным разрешением 10 м); векторные слои с точками фотосъемки, векторный линейный слой с изолиниями высот; векторный точечный слой с отметками высот; линейный слой речной сети. В работе также был использован спектральный аэроснимок высокого пространственного разрешения 2004 г. Он был ортотрансформирован в пакете ERDAS Imagine (ERDAS Inc., США). На его основе был создан векторный точечный слой, точки которого соответствуют местоположению деревьев в 2004 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность представления области, отображенной на фотоснимке, и соответствующей ей

области на карте открывает возможности для решения проблемы формирования у исследователя целостного представления изучаемого района с помощью ландшафтных фотоснимков (см. рис. 2). Кроме возможности отображения точек фотосъемки и визуального наложения друг на друга секторов, соответствующих разным фотоснимкам, геоинформационные технологии позволяют использовать функцию топологического наложения. Суть его заключается в пересечении всех полигонов (секторов видимости). Каждый полигон результирующего слоя, образованный в результате пересечения полигонов исходных слоев, в атрибутивной таблице будет содержать данные о номере точки фотосъемки, фотоснимках, которые были сделаны с них, а также дате съемки. Например, сделав запрос к полигону, образованному в результате пересечения секторов 54 и 248 из атрибутивной таблицы, будет получена информация о том, что участок местности, представленный этим полигоном, может быть виден на фотографиях, сделанных с этих точек.

Таким образом, полигональный слой или картосхема, сделанная на его основе, могут применяться в качестве интерфейса поиска и отображения фотографий в информационных системах.

Кроме того, что такой способ позволяет установить взаимосвязь между фотоснимками, он открывает дополнительные возможности при проведении их сравнительного анализа.

Так как на снимке отображены участки местности, находящиеся на разном удалении от наблюдателя, то информация, которую можно получить с использованием ландшафтного фотоснимка, относится к разным пространственным масштабам. Например, общие закономерности изменения местоположения древесной растительности, которые хорошо прослеживаются на дальнем плане на снимках, сделанных с точки номер 54 (см. рис. 1а, б), могут быть конкретизированы информацией, полученной для ближнего плана по фотографиям, сделанным с точки номер 247 (см. рис. 1в, г). На дальнем плане ландшафтного снимка можно установить факт смещения верхней границы леса и изменения густоты древостоев, а на ближнем плане другого снимка можно оценить особенности возобновления древесной растительности на определенном участке местности: видовой состав, обилие и жизнеспособность подроста, а также охарактеризовать другие особенности процессов, происходящих в растительном сообществе.

Проиллюстрируем это на следующем примере. В левой части фотоснимков, представленных на рис. 1а и 1б (точка фотосъемки 54), видна полоса деревьев, на рис. 1г видны взрослые деревья и подрост, относящиеся к данной полосе. В верхней части взрослых деревьев можно видеть участок ствола, частично или почти полностью лишенный веток. Такая форма кроны обусловлена тем, что эта полоса древесной растительности способствует накоплению снега, переносимого ветром, в зимний период. Высота сугроба достигает верхней части ствола, лишенного веток. В весенний период в результате повышения температуры воздуха снег уплотняется и, оседая, обламывает ветки. Это и приводит к появлению характерной формы кроны в верхней части ствола взрослых деревьев. Накопление большой массы снега может сопровождаться угнетением подроста из-за более позднего по сравнению с менее заснеженными участками схода снега, приводящего к сокращению периода вегетации на данном участке.

Таким образом, предлагаемый нами подход к представлению данных о ландшафтных снимках позволяет решить с их помощью проблему формирования у исследователя целостного представления изучаемого района.

Для решения проблемы получения дополнительных данных о местности, изображенной на фотоснимке, и создания, а также пополнения текстовых описаний и аннотаций к ландшафтным снимкам предлагается использовать пространственные данные и результаты моделирова-

ния в ГИС с последующим их наложением на сектор с областями видимости ландшафтного фотоснимка. На рис. 3 приведены два повторных ландшафтных фотоснимка, сделанных с точки номер 54. Каждый из них разбит вертикальными линиями на сегменты, как описано выше в разделе "Объекты и методика исследований". На рис. 4 приведены картосхемы для сектора с областями видимости, соответствующими этим повторным фотоснимкам, с наборами геоинформационных слоев. На рис. 4а приведены изолинии высот, изолинии расстояний от точки фотосъемки, а также местоположение деревьев в 2004 г. С помощью данной картосхемы можно определить высоту подъема границы древесной растительности и удаленность от наблюдателя участков местности, видимых на фотоснимках.

Совместное использование лучей и слоя с величинами крутизны склона позволяет облегчить задачу соотнесения фрагментов ландшафтного снимка с областями на карте. С помощью картосхемы, приведенной на рис. 4б, и фотоснимков, на которые нанесены вертикальные линии, можно установить соответствие местоположения исследуемых объектов на снимке и карте.

Экспозиция склона в сочетании с данными моделирования составного топографического индекса, характеризующего влажность поверхности исследуемого района, позволяют исследователю получить информацию, косвенно характеризующую поступление прямой солнечной радиации и гидрологический режим (см. рис. 4в). Наложение пространственных данных на сектор с областями видимости позволяет получить набор количественных характеристик участков местности, отображенных на снимке, а также расширить возможности исследователя по созданию текстовых описаний ландшафтных фотоснимков и аннотаций к ним. Приведенные на рис. 4 картосхемы иллюстрируют эту возможность.

Также необходимо отметить, что технология пространственного наложения геоинформационных слоев в пределах сектора с областями видимости, которые соответствуют ландшафтному снимку, открывает возможности для автоматической генерации текстовых описаний и аннотаций на основе заранее подготовленных тестовых шаблонов, в которые можно автоматически вставлять значения, диапазоны значений или соответствующие им фразы. Данная возможность становится особенно важной, если необходимо описывать тысячи или десятки тысяч ландшафтных фотоснимков.

Трудность получения интегральных оценок, характеризующих пространственно-временную динамику древесной растительности с использованием повторных ландшафтных фотоснимков на всей территории района исследований, выхо-

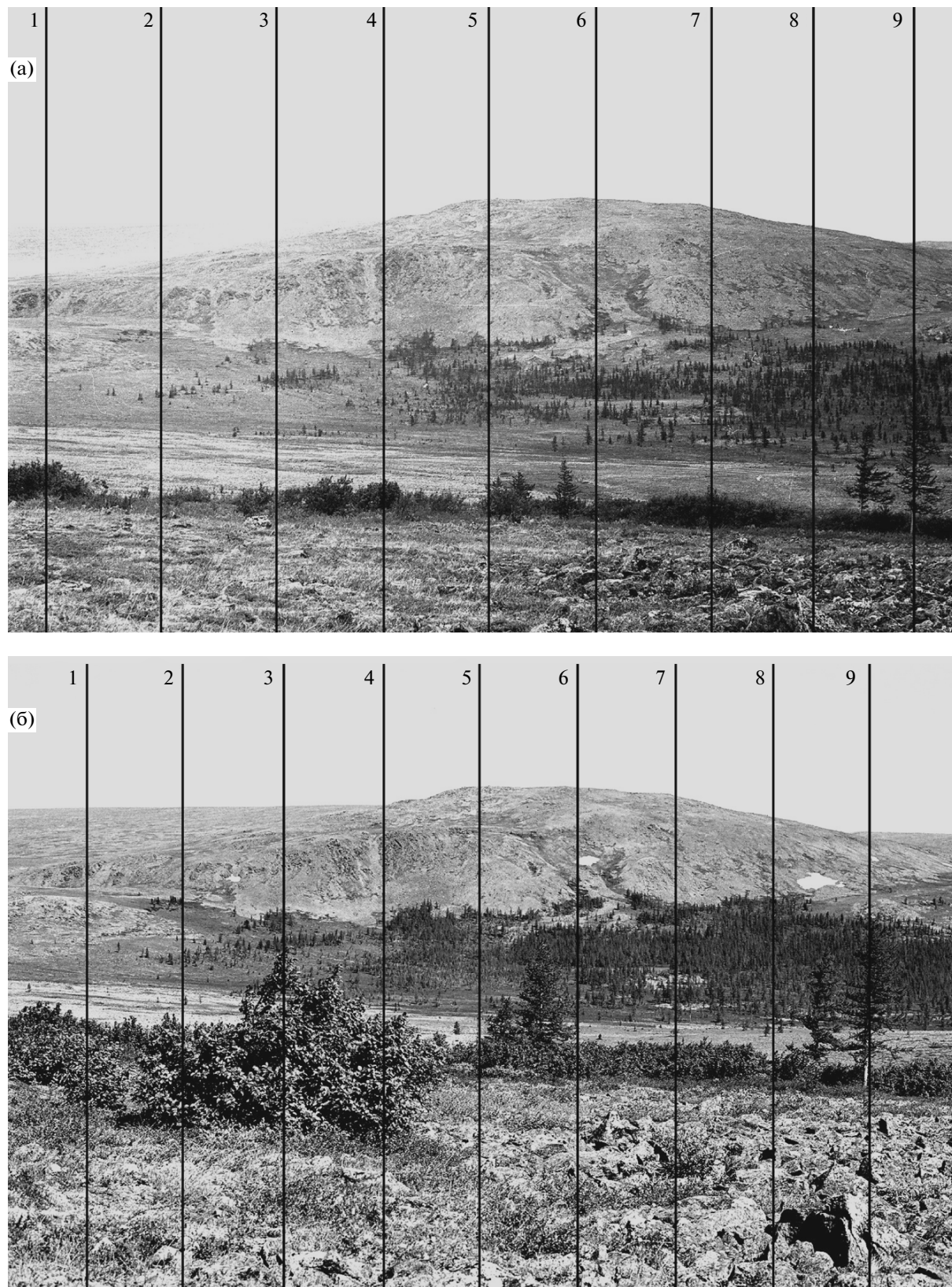


Рис. 3. Ландшафтные снимки, сделанные С.Г. Шиятовым с точки съемки № 54 в 1962 (а) и 2004 (б) гг. Вертикальные линии нанесены на снимки для облегчения идентификации участков местности и древесной растительности.

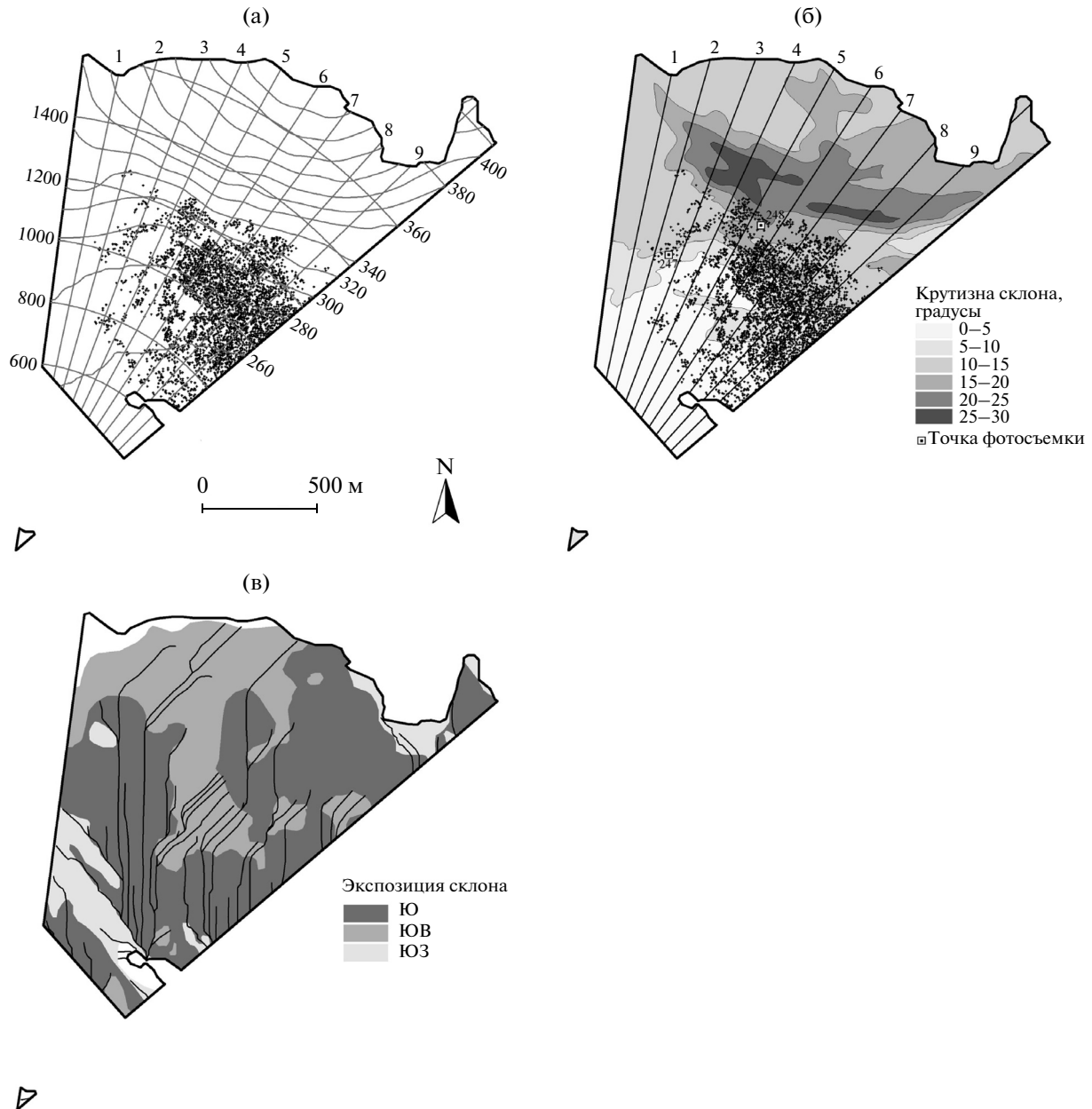


Рис. 4. Картограммы для сектора с областями видимости точки фотосъемки № 54:

а – распределение древесной растительности в 2004 г., изолинии высот и расстояния от точки фотосъемки; б – изменение значений крутизны склона, распределение древесной растительности в 2004 г. с указанием местоположения точек фотосъемки № 247 и № 248; в – экспозиция склона и направление движения водных потоков по поверхности.

дящих за пределы одного сектора, обусловлена несколькими причинами: сложностью переноса информации со снимка на карту; относительно низкой точностью нанесения объектов на нее, не позволяющей проводить некоторые виды количественного анализа; сложностью обобщения данных, полученных по разным фотоснимкам, соответствующих разным масштабам; трудностью сопоставления изменений нескольких пар повторных снимков, отличающихся интервалом

съемки. Ниже приведен разработанный нами один из вариантов решения проблемы создания тематических карт или картограмм с использованием повторных ландшафтных фотоснимков, который позволяет частично решить трудности, описанные выше.

На рис. 5 приведены картограммы, характеризующие основные изменения, которые произошли на участке местности, видимом из точки фотосъемки номер 54, за период с 1962 г. по 2004 г. Кар-

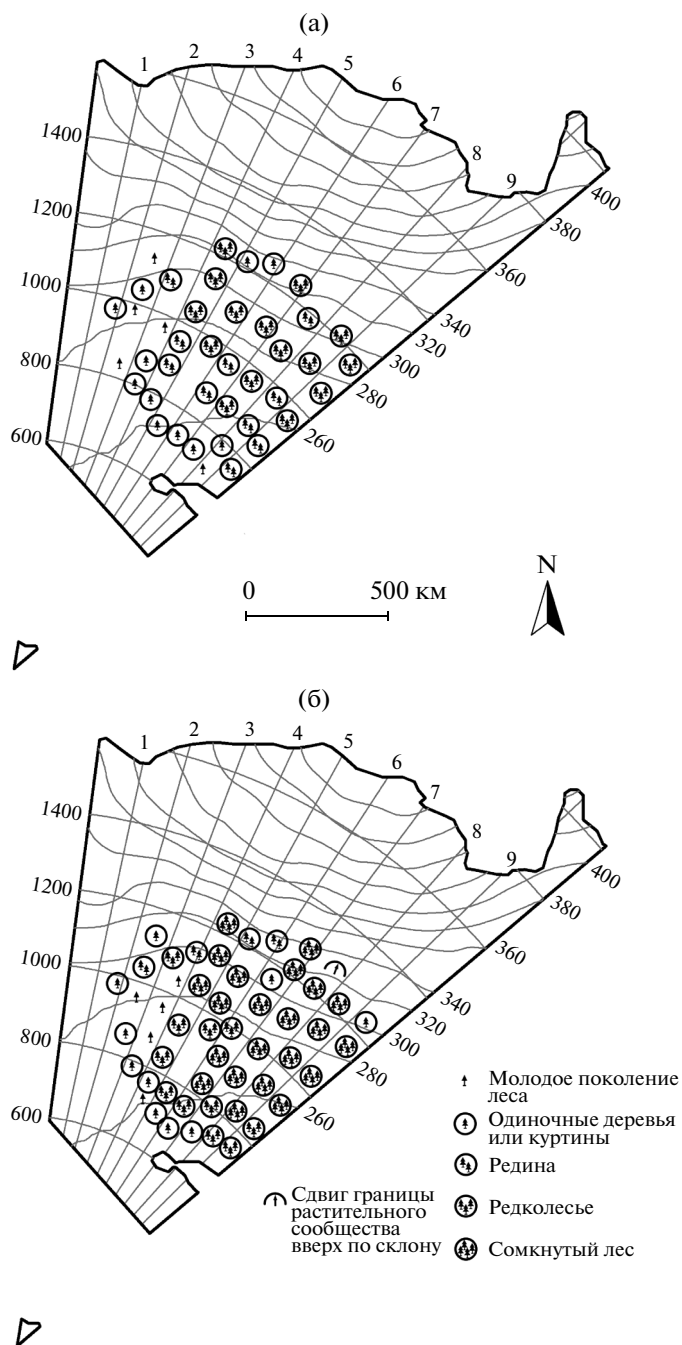


Рис. 5. Картосхемы, характеризующие древесную растительность в 1962 (а) и 2004 (б) гг. на участке склона горного массива Рай-Из, который виден на фотоснимках, сделанных с точки фотосъемки № 54.

тосхемы были созданы в результате сравнительного анализа фотоснимков, приведенных на рис. 3, а перенос на карту осуществлялся с использованием пространственных данных, приведенных на рис. 4б. Необходимо отметить, что картосхемы создавались одновременно. После установления местоположения объекта на снимках и карте на каждую из картосхем наносили условные знаки,

которые характеризовали исследуемый участок местности и объекты на нем: отсутствие или наличие молодого поколения древесной растительности, изменение густоты, продвижение растительности вверх по склону. Полученные таким образом картосхемы являются первым необходимым элементом для создания тематических карт или картосхем всей исследуемой территории на основе анализа повторных ландшафтных фотоснимков.

Набор, состоящий из повторных ландшафтных фотоснимков, пространственных данных и картосхем, приведенных на рис. 3–5, позволяет расширить представление о паспорте фотографий в системе наземного фотомониторинга (Нестеров, Сарычев, 2006). Этот набор, а также другие пространственные данные, представленные в пределах сектора с областями видимости для конкретной точки фотосъемки, могут быть использованы в качестве необходимых дополнительных документов наряду с координатами точки фотосъемки, входящих в паспорт.

Таким образом, предлагаемая методика анализа и представления наземных фотоснимков направлена на решение следующих проблем использования повторных ландшафтных снимков: формирования у исследователя целостного представления изучаемого пространства, получения дополнительных данных о местности, создания и пополнения текстовых описаний к ландшафтным снимкам и создания тематических карт или картосхем с использованием повторных ландшафтных фотоснимков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные задания высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности) № 2001 и гранта РФФИ № 15-04-05857а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Нестеров Ю.А., Сарычев В.С. Фотомониторинг ландшафтов Среднерусской лесостепи // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология, 2006. № 1. С. 53–63.
- Сарычев В.С. Фотомониторинг состояния популяции Шиверекии подольской *Schivereckia podolica* Andr. в заповеднике «Галичья Гора» // Экологические исследования в заповеднике «Галичья Гора». 2006. Вып. 1. С. 33–42.
- Сарычев В.С., Нестеров Ю.А. Фотографическое наследие В.Н. Хитрово // Вестн. Воронежского гос. ун-та, Серия: География. Геоэкология. 2007. № 2. С. 123–125.
- Фомин В.В. Климатогенная и антропогенная динамика древесной растительности во второй половине XX века. Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН, 2009. 150 с.
- Фомин В.В., Попов А.С., Низаметдинов Н.Ф. и др. Морфофизиологическая и автоматизированная оценка состояния сосновых древостоев в зоне действия атмо-

- сферных промышленных загрязнений // Лесной вестн. 2007. № 8. С. 75–79.
- Фомин В.В., Капралов Д.С., Попов А.С., Крюк В.И.* Автоматизированная оценка состояния деревьев с использованием системы анализа изображений // Лесной журн. 2008а. № 1. С. 24–30.
- Фомин В.В., Михайлович А.П., Попов А.С.* и др. Метрологические аспекты анализа изображений // Измерительная техника. 2008б. № 2. С. 25–28. [*Fomin V.V., Mikhailovich A.P., Popov A.S., Nizametdinov N.F., Shalautova Yu.V.* Metrological aspects of image analysis // Measurement Techniques № 01, 2008; 51(2), p. 146–151. DOI: 10.1007/s11018-008-9012-6.]
- Фомин В.В., Михайлович А.П.* Экологический фотомониторинг естественных и антропогенных ландшафтов // Аграрный вестник Урала. 2013. № 11(117). С. 16–21.
- Шиятов С.Г.* Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН, 2009. 216 с.
- Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В.* Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. 2005. № 2. С. 1–8. [*Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., and Fomin V.V.* Spatiotemporal Dynamics of Forest–Tundra Communities in the Polar Urals // Russian Journal of Ecology. 2005. V. 36. № 2. P. 69–75.]
- Evans J.* Compound Topographic Index // <http://arcscrip.esri.com/details.asp?dbid=11863>, 2003.
- Dahdouh-Guebas F., Koedam N.* Long-term retrospection on mangrove development using transdisciplinary approaches: A review // Aquatic Botany. 2008. V. 89. P. 80–92.
- Hall F.C.* Ground-Based Photographic Monitoring // General Technical Report PNW-GRT-503 U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station–Portland. 2001. С. 1–40.
- Hendrick L.E., Copenheadver C.A.* Using Repeat Landscape Photography to Assess Vegetation Changes in Rural Communities of the Southern Appalachian Mountains in Virginia, USA // Mountain Research and Development. 2009. V. 29. № 1. P. 21–29.
- Webb R.H., Boyer D.E., Turner R.M.* Repeat photography: methods and applications in the Natural Sciences. Washington, Covelo, London: IslandPress, 2010. 338 p.