

## ГЕОМОРФОЛОГИЯ, ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья  
УДК 581.524 (571.150)  
doi: 10.17223/25421379/23/8

### ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЭКОСИСТЕМ ГОРНОЙ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОГО АЛТАЯ

Мария Андреевна Смирнова<sup>1</sup>, Максим Викторович Бочарников<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>1</sup> *Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

<sup>1</sup> *summerija@yandex.ru*

<sup>2</sup> *maxim-msu-bg@mail.ru*



**Аннотация.** Работа направлена на развитие подходов крупномасштабного цифрового картографирования экосистем горных территорий. Показано, что региональная специфичность лесостепных экосистем Западного Алтая проявляется в доминировании мезофильных луговых и кустарниковых сообществ, а также в развитии мелколиственных и светлохвойных лесов на комбинациях черноземов квазиглеевых, темногумусовых глеевых почв и черноземов глинисто-иллювиальных. Степные сообщества занимают менее 2 % от площади ключевого участка.

**Ключевые слова:** структура почвенного покрова, черноземы, кустарниковые сообщества, луговые степи, цифровая почвенная картография, дистанционное зондирование Земли, многомерный анализ, Тигирекский заповедник, Драгунское плато

**Источник финансирования:** Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1133.2020.5.

**Для цитирования:** Смирнова М.А., Бочарников М.В. Цифровое картографирование и анализ пространственной структуры экосистем горной лесостепи Западного Алтая // Геосферные исследования. 2022. № 2. С. 127–144. doi: 10.17223/25421379/23/8

Original article  
doi: 10.17223/25421379/23/8

### PREDICTIVE ECOSYSTEM MAPPING AND SPATIAL STRUCTURE ANALYSIS FOR THE MOUNTAIN FOREST-STEPPE OF WEST ALTAI

Maria A. Smirnova<sup>1</sup>, Maxim V. Bocharnikov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>1</sup> *V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia*

<sup>1</sup> *summerija@yandex.ru*

<sup>2</sup> *maxim-msu-bg@mail.ru*

**Abstract.** Predictive ecosystem mapping is the basic tool for the conservation of biodiversity and its spatial structure analyses. This paper presents an ecosystem mapping approach that connected remote sensing data (SRTM, Landsat) and soil (at 92 points) and vegetation (at 64 points) description for the key site located at Tigirek nature reserve (West Altai). The linear discriminant analysis with stepwise selection of predictors (more than 60 morphometric parameters and spectral indices) is used to modeling of the vegetation and soil spatial structure. The topography classification is based on exposition and slope steepness. The ecosystem map is compiled through an overlay of soil, vegetation, and relief maps and contains 38 units. The altitude, slope, and reflection (Landsat 5, October 2011) are the main factors that determine the soil cover spatial structure; the user's accuracy of the model is 64 %. Greyzemic Chernozems (100 %), Gleyic Cambisols (92 %), and Rendzic Leptosols (89 %) have the best quality of discrimination. Altitude and 3 spectral parameters (wetness, brightness, EVI) determine the vegetation spatial structure; the user's accuracy of the model is 73 %. The dominance of mesophilic meadows and shrub communities, and also small-leaf and

light coniferous forests reflects the regional features of Altai forest-steppe ecosystems. Shrub communities with *Caragana arborescens* in combination with Gleyic Chernozems and Gleyic Cambisols on different slopes are predominant ecosystems in the key area. The area of meadows with *Dactylis glomerata* and *Bromus squarrosus*, formed mainly on Chernic Phaeozems and Gleyic Chernozems, Cambisols, Rendzic Leptosols, and Novic Retisols on uplands and slopes of different exposure, are the second and third on the key site. The analysis of components of ecosystems characterizes the limited opportunities of indication of soils by vegetation due to only a few vegetation communities have strong confinement to soils (the area of such vegetation is about 10 % of the key site).

**Keywords:** soils, vegetation, remote sensing, discriminant analysis, Tigirek reserve

**Source of financing:** This research was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of M.V. Lomonosov Moscow State University “Future Planet and Global Environmental Change” and with the financial support of the President of the Russian Federation grant for young scientists MK-1133.2020.5.

**For citation:** Smirnova, M.A., Bocharnikov, M.V. (2022) Predictive ecosystem mapping and spatial structure analysis for the Mountain Forest-Steppe of West Altai. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 127–144. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/23/8

## Введение

Картографирование экосистем является ключевым направлением развития экологии и биогеографии, а разрабатываемые при этом подходы и непосредственно сами карты – базовый инструмент охраны биоразнообразия и его оценки [Kuchler, 1973; Киселев, 2000; Котова, Огуреева, 2007; Blasi et al., 2017; Malavasi, 2020]. В настоящее время все большую актуальность приобретают цифровые методы создания карт с привлечением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); такое сочетание позволяет, во-первых, формализовать процесс создания карт, во-вторых, значительно удешевить его при увеличении скорости производства, в-третьих, проводить мониторинг состояния экосистем при обновлении данных ДЗЗ и создании актуальных карт по существующей формализованной методике [Rocchi et al., 2013; Reddy et al., 2015; Malavasi, 2020; Searle et al., 2021]. Данный подход особенно перспективен для картографирования труднодоступных территорий [Kerr, Ostrovsky, 2003; Vanselow et al., 2014].

Наиболее часто при цифровом картографировании экосистем используются данные цифровых моделей рельефа и спутниковых многоканальных систем, позволяющих с высокой точностью дешифровать растительный покров, водные объекты и выходы на поверхность плотных незадернованных пород [Blasi et al., 2017; Malavasi, 2020]. Отсутствие данных обо всех компонентах экосистем, в первую очередь о таком важном составляющем, как почвенный покров, часто приводит к тому, что на картах экосистем основное внимание уделяется параметрам растительности и рельефа [Olson et al., 2001]. Включение почвенного компонента в содержание карт является необходимым элементом картографирования экосистем, при этом важно учитывать разную сенсорность и рефлекторность почвенного и растительного ком-

понентов экосистем [Хорошев, 2004]. В результате одни и те же растительные сообщества могут формироваться на разных почвах, и наоборот, на одних и тех же почвах могут произрастать разные растительные сообщества [Лойко и др., 2010; Бочарников, Смирнова, 2019]. В связи с этим использование единой картографической модели, детерминированной экологическими факторами и включающей одновременно параметры почв и растительности, не всегда является оправданным, особенно для горных экосистем, отличающихся динамичностью и сложной историей развития их компонентов [Владыченский, 1998; Broll, Keplin, 2005; Dufour et al., 2006].

Территория Алтайской горной области характеризуется высоким экосистемным разнообразием, однако в силу своей труднодоступности изучена крайне неравномерно. При наличии обзорных ботанико-географических работ [Кумина, 1960; Огуреева, 1980] и мелкомасштабных тематических карт [Алтайский..., 1978] некоторые провинции в целом и часть природных районов Алтая до сих пор не охвачены крупномасштабным картированием экосистем. Территория Тигирекского государственного природного биосферного заповедника (Алтайский край, Западный Алтай), ее охранной зоны и прилегающих пространств становились объектом небольшого количества научных исследований. Тем не менее существуют работы, содержащие результаты крупномасштабного картографирования растительности [Федоткина и др., 2009] и ландшафтов [Черных, Золотов, 2015], выполненные традиционным экспертным методом с привлечением данных ДЗЗ. Сравнение результатов цифрового и традиционного картографирования на одну и ту же территорию, а также данных полевого опробования позволит верифицировать полученные цифровые модели и обосновать их дальнейшее использование для составления крупномасштабных карт экосистем ранее неисследованных сопредельных территорий.

Цель настоящей работы – оценка пространственной структуры экосистем лесостепного пояса Западного Алтая на основе цифрового картографирования с применением многомерного анализа дистанционных данных и полевых описаний почв и растительности. Экосистема понимается как взаимообусловленная совокупность биоты и комплекса абиотических условий, объединенная функциональными связями и выявляемая на разных пространственных уровнях [Уиттекер, 1980]. Растительность рассмотрена в качестве базового компонента, общее типологическое разнообразие которого поддерживается современными климатическими условиями и является результатом длительного сопряженного развития с другими компонентами экосистем, прежде всего с почвами, маркируя экотопические условия через элементы сложного горного рельефа. Данное исследование построено на анализе элементарных экосистем топологического уровня, при выделении которых принималось во внимание единство почв и растительных сообществ в пределах элементарных форм рельефа

с единством экологических условий. В работе решались следующие задачи:

- 1) сбор и обработка данных полевого опробования, дистанционного зондирования Земли;
- 2) составление численных моделей почвенно- и растительно-ландшафтных связей между данными полевого опробования компонентов экосистем и данными ДЗЗ;
- 3) цифровое картографирование растительного и почвенного покровов на основе полученных моделей;
- 4) составление карты экспозиций и крутизны склонов на основании цифровой модели рельефа;
- 5) составление карты экосистем путем наложения карт почв, растительности, экспозиции и крутизны склонов;
- 6) верификация полученной карты экосистем;
- 7) пространственный анализ структуры горных экосистем лесостепного пояса Западного Алтая.

Принципиальная схема исследования показана на рис. 1.

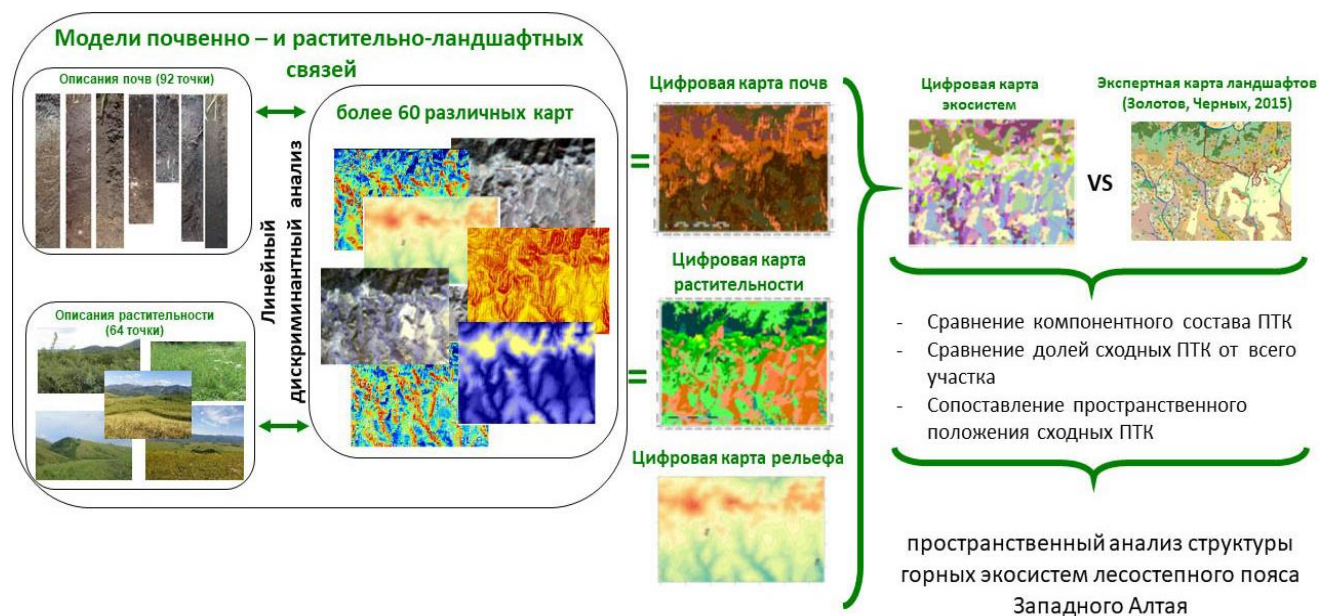


Рис. 1. Принципиальная схема исследования  
ПТК – природно-территориальные комплексы

Fig. 1. Graphical abstract of the research  
ПТК – landscapes

### Физико-географическая характеристика района исследований

Пояс оробореальной лесостепи Западного Алтая характеризуется повышенным уровнем экосистемного разнообразия [Давыдов и др., 2011; Черных, Золотов, 2015]. Луговые степи, преимущественно богато-разнотравно-дерновиннозлаковые (*Stipa pennata* L.,

*Phleum phleoides* (L.) H. Karst., *Filipendula vulgaris* Moench, *Medicago falcata* L.), произрастают совместно с кустарниковыми зарослями (*Spiraea crenata* L., *Caragana arborescens* Lam., *Rosa spinosissima* L.), являющимися уникальным компонентом растительного покрова для гор Южной Сибири [Лашинский и др., 2009], а также с сосновыми (*Pinus sylvestris* L.), лиственничными (*Larix sibirica* Ledeb.) и березовыми

(*Betula pendula* Roth) лесами. В состав почвенного покрова входят черноземы выщелоченные и лугово-черноземные почвы, широкое распространение имеют дерновые почвы, в том числе дерново-карбонатные [Почвы..., 1959]. Повсеместно распространены карбонатные почвообразующие породы, представленные щебнистым элювием коренных пород, выходами известняков, лессами; в ложбинах встречаются делювиальные отложения и делювиально-пролювиальные шлейфы. Рельеф представлен сопками, перевальными седловинами, террасовидными слабо-наклонными площадками и плакорами, долинами малых рек и ручьев с V-образными и U-образными поперечными профилями. Абсолютные высоты варьируют от 600 до 1 000 м. Средняя температура июня составляет +17 °С, января –15 °С. Количество осадков в среднем составляет 600 мм/год; они выпадают неравномерно как по сезонам, так и по годам [Черных, Золотов, 2015].

Для проведения полевых исследований и выявления закономерностей пространственной структуры растительного и почвенного покровов лесостепного пояса выбран ключевой участок с максимально пол-

ным для небольшой территории охватом разнообразия экологических условий на разных элементах рельефа. Он расположен на территории Драгунского плато в низкогорьях Западного Алтая и занимает площадь 7 × 4,5 км.

## Материал и методы исследования

### Характеристика исходных данных

В качестве исходных данных для построения численных моделей почвенно- и растительно-ландшафтных связей и последующего картографирования использованы следующие материалы: данные полевого почвенного опробования в 92 точках, полные геоботанические описания в 64 точках, цифровая модель рельефа SRTM и материалы многозональных снимков систем Landsat-8 (с датами съемки 15.06.2014, 11.08.2014 и 10.02.2015) и Landsat-5 (дата съемки 13.10.2011) с полностью безоблачным покрытием на выбранный ключевой участок. Цифровая модель рельефа и точки полевых описаний представлены на рис. 2.

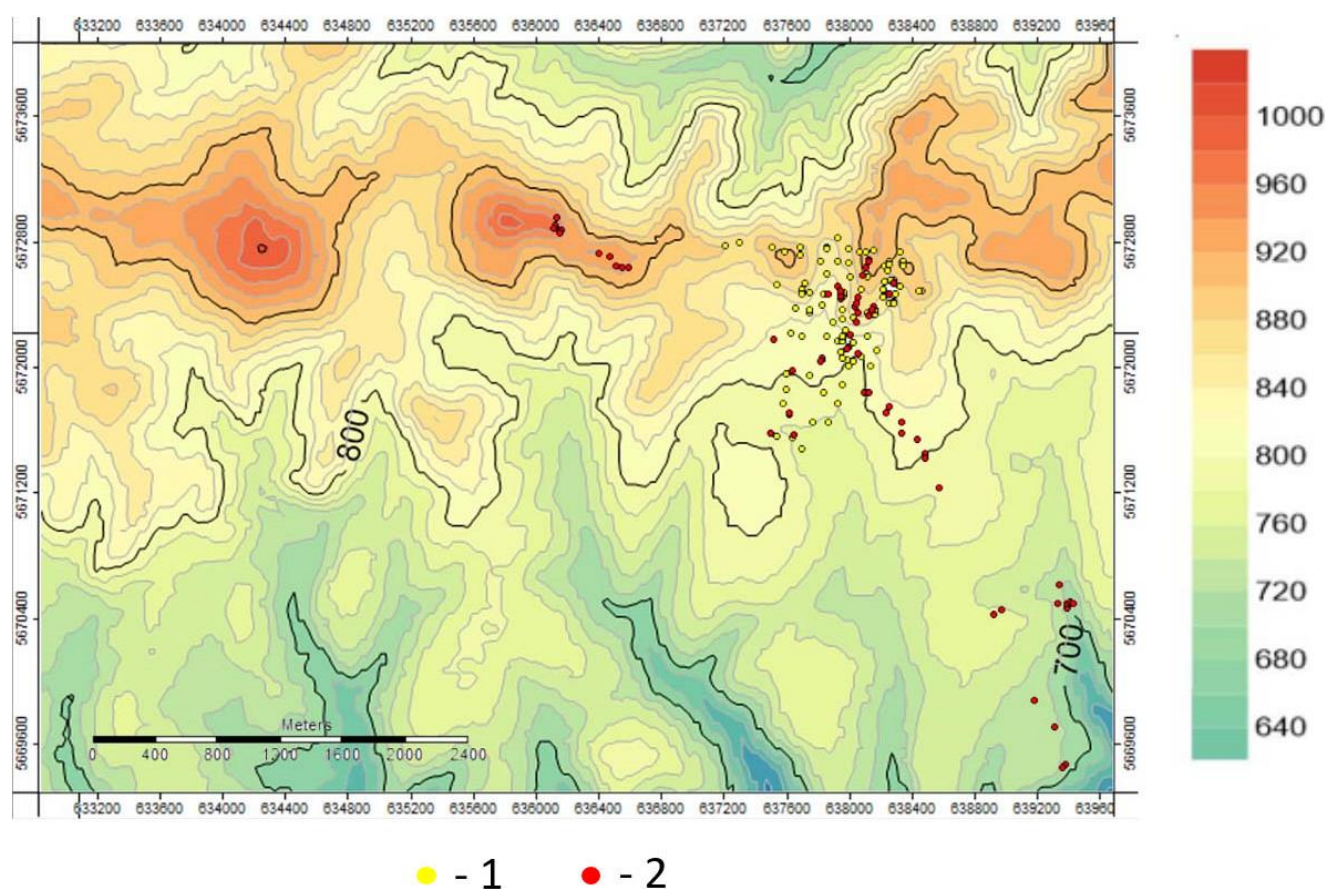


Рис. 2. Рельеф ключевого участка

1 – точки полевого опробования почв; 2 – точки полных геоботанических описаний.

Fig. 2. Digital elevation model of key site with points of soil (1) and geobotanical (2) descriptions

Анализ отражательной способности объектов в разные сезоны года (первая и вторая половины вегетационного сезона, осенний и зимний периоды) позволил наиболее полно учесть ход сезонных изменений, характерных для территории исследований, прежде всего разнообразия и структуры ее растительного покрова, а также экосистем в целом. Использовано семь каналов видимого и инфракрасного диапазонов спектра снимков Landsat-8 и шесть каналов Landsat-5, для которых проведена радиометрическая калибровка (reflectance), позволившая получить собственные значения отражения солнечной радиации от объектов.

Исследованные на ключевом участке почвы представлены восемью почвенными таксонами (в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [2004]: черноземами глинисто-иллювиальными (Чги, 16 точек), черноземами (10 точек), черноземами квазиглеевыми (Чквг, 10 точек), темно-серыми почвами (Л, 6 точек), темногумусовыми метаморфи-

зованными (Т, 12 точек), темногумусовыми глеевыми (Тг, 11 точек), литоземами (Лит, 20 точек) и стратоземами (Ст, 7 точек). Формационное разнообразие растительности насчитывает 12 подразделений и приведено в табл. 1. Типологическое разнообразие растительности (в соответствии с эколого-фитоценотическими [Нешатаев, 1987] и географо-генетическими [Сочава, 1980] принципами их классификации), представлено лиственничными (*Larix sibirica*), березовыми (*Betula pendula*) и осиновыми (*Populus tremula* L.) лесами Урало-Южносибирской фратрии формаций, луговыми, кустарниковыми и степными сообществами Заволжско-Казахстанской фратрии. Региональная специфичность лесостепного пояса определяется фоновым участием кустарниковых зарослей: мезофильных луговых карагановых (*Caragana arborescens*) и шиповниковых (*Rosa acicularis* Lindl.) сообществ, мезоксерофильных лугово-степных спирейных (*Spiraea crenata*, *S. trilobata* L.) и кизильниковых (*Cotoneaster melanocarpus* Fisch. ex Blytt) сообществ.

Таблица 1

Типологическое разнообразие растительности ключевого участка и исходные полевые данные

Table 1

Typological diversity of vegetation of the key site and field data

| № п.п. | Типологические подразделения                      | Количество описаний |    | 12 типологических подразделений                            | Количество описаний |
|--------|---------------------------------------------------|---------------------|----|------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1      | Светлохвойные и мелко-лиственные леса             | 8                   | 1  | Лиственничные ( <i>Larix sibirica</i> )                    | 3                   |
|        |                                                   |                     | 2  | Березовые ( <i>Betula pendula</i> )                        | 3                   |
|        |                                                   |                     | 3  | Осиновые ( <i>Populus tremula</i> )                        | 2                   |
| 2      | Разнотравные луга                                 | 22                  | 4  | Костровые ( <i>Bromus squarrosus</i> )                     | 7                   |
|        |                                                   |                     | 5  | Вейниковые ( <i>Calamagrostis arundinacea</i> )            | 7                   |
|        |                                                   |                     | 6  | Ежовые ( <i>Dactylis glomerata</i> )                       | 8                   |
| 3      | Кустарниковые луговые и лугово-степные сообщества | 27                  | 7  | Карагановые ( <i>Caragana arborescens</i> )                | 5                   |
|        |                                                   |                     | 8  | Кизильниковые ( <i>Cotoneaster melanocarpa</i> )           | 7                   |
|        |                                                   |                     | 9  | Шиповниковые ( <i>Rosa acicularis</i> )                    | 8                   |
|        |                                                   |                     | 10 | Спирейные ( <i>Spiraea crenata</i> , <i>S. trilobata</i> ) | 7                   |
| 4      | Луговые степи                                     | 5                   | 11 | Стопovidносоковые ( <i>Carex pediformis</i> )              | 2                   |
|        |                                                   |                     | 12 | Овсецовые ( <i>Helictotrichon altaicum</i> )               | 3                   |

### Создание моделей почвенно- и растительно-ландшафтных связей, оценка точности моделей

Построение моделей почвенно- и растительно-ландшафтных связей основано на поиске факторно-индикационных характеристик, наиболее полно описывающих пространственную дифференциацию почв и растительности на ключевом участке, и установлении количественных связей между выбранными факторно-индикационными характеристиками и описаниями почв, растительности, выполненными в точках полевого опробования. Для построения моделей был использован метод линейного дискриминантного анализа с пошаговым отбором предикторов. Точность полученных цифровых моделей (или пользователь-

ская точность) оценивалась путем сопоставления предсказанной по модели категории почв / растительности и фактической (т.е. диагностированной при полевом обследовании) в точке опробования.

В качестве факторно-индикационных характеристик было использовано более 60 морфометрических параметров рельефа и значений различных спектральных индексов, рассчитанных в программах SAGA GIS и MultiSpec. На основании цифровой модели рельефа были рассчитаны значения экспозиции и крутизны склонов, глубины замкнутых депрессий, поперечной, плановой и общей кривизны, общей и модифицированной площади водосбора, топографического индекса влажности, индекса длины и крутизны склона (LS-фактор), превышения над базисом

эрозии, индекса неровности поверхности (TRI), относительного превышения (TPI) в окрестности 250 м, 500 м, 750 м и далее до 1 500 м с шагом в 250 м, а также величина потенциальной суммарной солнечной радиации. На основе многозональных снимков были получены значения вегетационных индексов, характеризующих запасы биомассы и биологическую продуктивность экосистем: вегетационный индекс (DVI), нормализованный вегетационный индекс (NDVI), зеленый нормализованный вегетационный индекс (GreenNDVI), расширенный вегетационный индекс (EVI). Также рассчитаны индексы, характеризующие свойства почв и горных пород (Green / Blue; SAVI) и различные типы экосистем (Red / Green). Дополнительно выполнено преобразование исходных спектральных каналов многозональных снимков методом Kauth's Tasseled Cap [Kauth, Thomas, 1976]. Он основан на трансформации признакового пространства снимка с использованием эмпирически подобранных коэффициентов к значениям исходных спектральных каналов. В результате поворота признакового пространства снимков относительно исходных координатных осей максимальная изменчивость признаков находит отражение на новых осях. На основе выявленных для снимков Landsat-8 коэффициентов, позволяющих наилучшим образом разделить разные характеристики экосистем, находящие отражение в зафиксированных показателях излучения [Baig et al., 2014], получены три переменные: яркости (TCB – brightness), зелени (TCG – greenness) и влажности (TCW – wetness). Трансформированные каналы характеризуют общее альбедо («яркость»), интенсивность фотосинтеза («зеленость») и содержание влаги («влажность»). Таким образом, для каждого сезона определены значения спектральной яркости семи (для Landsat-8) или шести (для Landsat-5) каналов многозональной съемки и десяти индексов, в совокупности позволяющих анализировать спектральное разнообразие объектов и их характеристик на ключевом участке.

### ***Картографирование почвенного покрова, растительности, особенностей рельефа и построение карты экосистем***

Результатом выполнения линейного дискриминантного анализа являются таблицы, в которых каждая отдельная строка содержит информацию о координатах центра пикселя размером  $30 \times 30$  м и апостериорной вероятности встречи в этом пикселе (от 0 до 1) каждого из 12 подразделений растительности (или восьми категорий почв), используемых в анализе. Каждая из таблиц содержит чуть более 35 тыс. строк.

Картографирование растительности было выполнено следующим образом. Для каждого пикселя было выполнено сравнение значений апостериорных вероятностей встречи одной из 12 категорий растительности и выявлена преобладающая категория. Информация о преобладающей категории и апостериорная вероятность встречи этой категории в пикселе были добавлены в новые столбцы таблицы. В программе SAGA GIS полученная таблица была преобразована в набор точечных данных (каждая точка соответствовала центру пикселя  $30 \times 30$  м). Значения преобладающей категории в точках были интерполированы на всю территорию ключевого участка методом ближайшего соседа (Nearest neighbor).

В отличие от пространственного уровня выявления растительных сообществ, сопоставимого с разрешением используемых материалов космической съемки, размер элементарных почвенных ареалов в пределах горной лесостепи существенно меньше, чем  $30 \times 30$  м [Фридланд, 1972], поэтому в качестве объекта картографирования почв были выбраны не отдельные почвенные ареалы, а комбинации почв. Полученная в результате дискриминантного анализа апостериорная вероятность была проинтерпретирована как долевое участие почвы в пределах пикселя [Сорокина, Козлов, 2009]. С целью визуализации полученной цифровой базы данных в виде карты нами было выделено 12 различных комбинаций; каждая комбинация содержит от 1 до 3 компонентов, перечисленных в порядке убывания занимаемых площадей (сумма долей всех компонентов превышает 0,75 от площади пикселя. Интерполяция точечных данных, изъятых из таблицы, проводилась методом ближайшего соседа (Nearest neighbor).

Классификация рельефа произведена на основе анализа цифровой модели рельефа; учитывались крутизна склона (плоские поверхности ( $0-3^\circ$ ), пологие склоны ( $3-8^\circ$ ), склоны средней крутизны ( $8-15^\circ$ ) и крутые склоны (более  $15^\circ$ )) и экспозиция (теневая, световая и нейтральная). Всего выделено 12 классов.

Карта экосистем получена путем наложения карт почвенных комбинаций, растительности и рельефа. Объединение полученных при пересечении карт категорий проводилось экспертным методом с учетом возможных вариантов сочетаний компонентов и занимаемых экосистемами площадей; основным критерием служила общность растительного и почвенного компонентов категорий, в меньшей степени – особенности рельефа. Всего результирующая карта экосистем содержит 35 категорий.

Верификация карты экосистем проведена путем ее сравнения с опубликованной ландшафтной картой [Черных, Золотов, 2015] на ключевой участок. Для этого ландшафтная карта была отсканирована, вы-

полнены пространственная привязка карты и оцифровка. Для сопоставления карт экосистем и ландшафтов осуществлена корреляция легенды ландшафтной карты экспертным методом; в частности, названия почв были приведены в соответствие с Классификацией и диагностикой почв России [2004]. Соответствующими друг другу считались такие комбинации, где совпадали два и более компонентов (например, было принято, что комбинация ЧквгТг ландшафтной карты соответствует комбинации ЧквгТгЧги карты экосистем и т.д.). Принципы классификации растительных сообществ, использованные при составлении карт экосистем и ландшафтов, были схожими, поэтому сравнение растительности проведено по сходству ее типологического состава. При этом некоторые картографические подразделения на ландшафтной карте представлены сочетаниями двух и более типов сообществ; в таком случае сравнение проводилось по основному типу. Описания особенностей рельефа, приведенные в ландшафтной карте (угол наклона, экспозиция), в целом соответствуют таковым на карте экосистем. Оценка соответствия карт была проведена на основе сравнения компонентного состава картографических единиц, их пространственного положения и долей, занимаемых различными компонентами, от площади всего ключевого участка.

## Результаты и обсуждение

### Модель растительно-ландшафтных связей

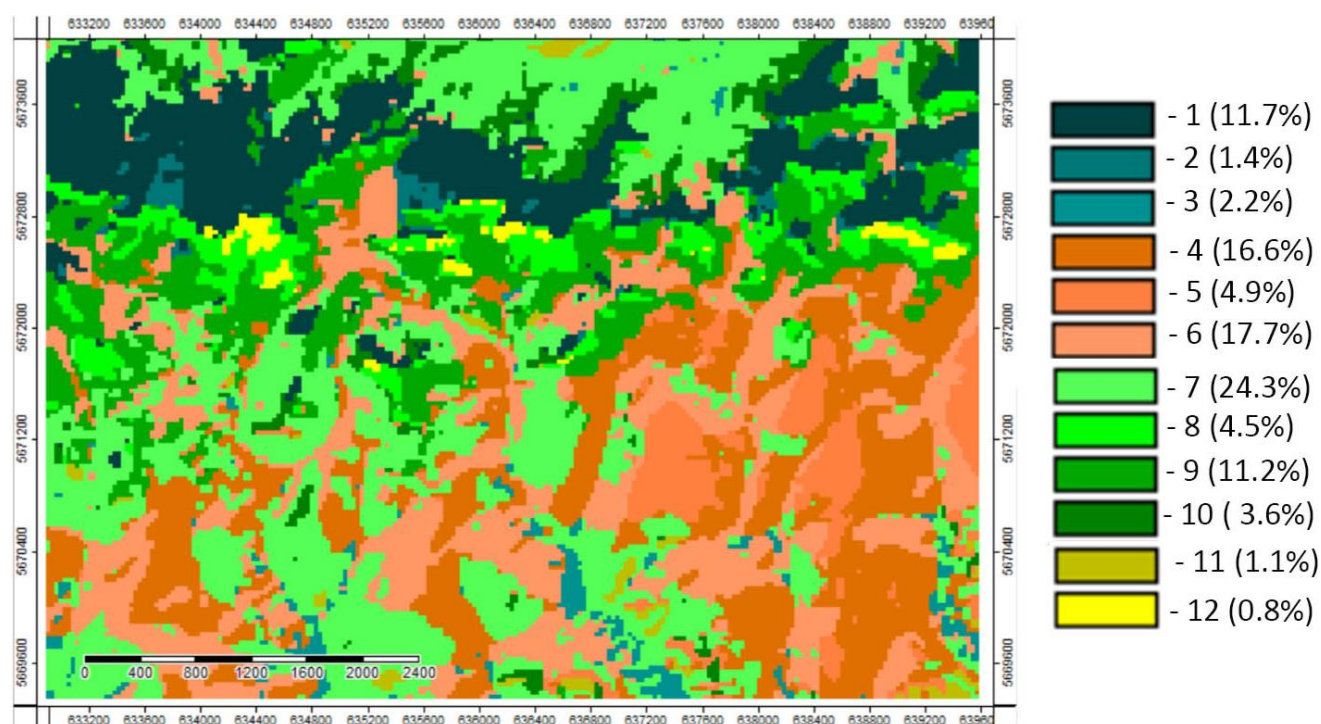
Пространственную структуру растительного покрова на уровне 12 типологических подразделений уровня растительных формаций определяют три спектральные (показатели влажности, яркости и расширенного вегетационного индекса) и одна морфометрическая (абсолютная высота) переменные. Точность модели составляет 73,3 %. Наилучшее качество дискриминации имеют сообщества всех лесных формаций; сообщества луговых, кустарниковых и степных формаций характеризуются значительной изменчивостью показателя верно классифицированных (от 37,5 до 100 %). Общее качество анализа остается высоким, надежно описывающим структуру экотопических условий. Высокая значимость абсолютной высоты в пределах одного высотного пояса свидетельствует о катенарных закономерностях в распределении сообществ фоновых формаций. Элювиальные позиции на склонах занимают преимущественно мезофильные и ксеро-мезофильные луговые и степные сообщества, а к транзитным и аккумулятивным тяготеют березовые и осиновые леса, кустарниковые заросли с доминированием *Caragana arborescens*, *Rosa acicularis*.

### Модель почвенно-ландшафтных связей

При определении пространственной дифференциации почв значимыми факторами оказались угол наклона склона, абсолютная высота, экспозиция и значения показателя яркости (по снимку Landsat 5, октябрь 2011). Точность модели составляет 64 %. Наиболее высоким качеством дискриминации характеризуются серые почвы (100 %), темногумусовые глеевые (92 %) и литоземы (89 %); наихудшим – темногумусовые почвы (31 %) и стратоземы (43 %). Угол наклона склона позволяет отделить полнопрофильные почвы (черноземы, черноземы глинисто-иллювирированные, черноземы квазиглеевые, серые) от слаборазвитых (темногумусовых, темногумусовых глеевых, литоземов); абсолютная высота определяет положение стратифицированных почв и темногумусовых глеевых почв в подчиненных участках катен. Значения экспозиций склона главным образом характеризует приуроченность серых почв к склонам теневых экспозиций. Значения показателя яркости связаны с особенностями напочвенного покрова и позволяют разделить почвы, преимущественно формирующиеся под лесными сообществами (серые, черноземы), от почв, формирующихся под кустарниковыми (темногумусовые почвы, литоземы), луговыми (черноземы квазиглеевые) и степными сообществами (литоземы).

### Карта растительного покрова

Карта растительного покрова представлена на рис. 3. В составе растительного покрова доминирующую роль играют кустарниковые сообщества (более 40 % территории ключевого участка), среди которых выделяются карагановые сообщества, занимающие 1/4 общей площади. Их доминантом выступает *Caragana arborescens*, южносибирский элемент, который распространен в достаточно тепло- и влагообеспеченных районах низкогорий юга Сибири. Он как формирует открытые кустарниковые заросли на Алтае, Кузнецком Алатау, Салаирском кряже и прилегающих равнинах в условиях неглубокого залегания скальных пород [Куминова, 1960; Лашинский и др., 2009], так и участвует в подлеске гемибореальных березово-сосновых карагановых типов леса [Бочарников, 2015]. Также на достаточно большой площади распространены шиповниковые заросли с *Rosa acicularis*, видом с обширным ареалом, на большей части которого он произрастает под древесным пологом лесных сообществ. На ключевом участке он формирует кустарниковые сообщества в схожих условиях, часто совместно с караганой и комплексом мезофитов (*Dactylis glomerata* L., *Thalictrum minus* L., *Clematis integrifolia* L.).



**Рис. 3. Карта растительности ключевого участка с указанием площадей (в процентах), занимаемых сообществами типологических подразделений**

1 – лиственничные (*Larix sibirica*) леса; 2 – березовые (*Betula pendula*) леса; 3 – осиновые (*Populus tremula*) леса; 4 – костровые (*Bromus squarrosus*) луга; 5 – ве́йниковые (*Calamagrostis arundinacea*) луга; 6 – ежовые (*Dactylis glomerata*) луга; 7 – карагано-вые (*Caragana arborescens*) сообщества; 8 – кизильниковые (*Cotoneaster melanocarpa*) сообщества; 9 – шиповниковые (*Rosa acicularis*) сообщества; 10 – спирейные (*Spiraea crenata*, *S. trilobata*) сообщества; 11 – стоповидноосоковые (*Carex pediformis*) степи; 12 – овсецовые (*Helictotrichon altaicum*) степи

**Fig. 3. Vegetation map of the key site with the areas (in percent) occupied by communities of typological subdivisions**

1 – larch (*Larix sibirica*) forests; 2 – birch (*Betula pendula*) forests; 3 – aspen (*Populus tremula*) forest; 4 – *Bromus squarrosus* meadows; 5 – *Calamagrostis arundinacea* meadows; 6 – *Dactylis glomerata* meadows; 7 – *Caragana arborescens* communities; 8 – *Cotoneaster melanocarpa* communities; 9 – *Rosa acicularis* communities; 10 – *Spiraea crenata*, *S. trilobata* communities; 11 – sedge (*Carex pediformis*) steppes; 12 – oatmeal (*Helictotrichon altaicum*) steppes

Около 30 % территории приходится на разнотравные луга, преобладающие на склонах хребтов, среди которых доминируют сообщества ежовой (*Dactylis glomerata*) и костровой (*Bromus squarrosus* L.) формаций с небольшим участием ве́йниковых (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth) лугов. Все луга характеризуются высокой степенью общности видового состава. В ежовых лугах постоянными элементами являются луговые и лесолуговые мезофитные виды с обширным распространением – *Phleum pratense* L., *Phlomis tuberosa* (L.) Moench, *Galium boreale* L., *Origanum vulgare* L. Схожими по своему составу, структуре и занимаемой площади являются костровые луга. Небольшое распространение имеют ве́йниковые сообщества, в которых содоминантом выступает ежа сборная. Они приурочены к более пологим склонам хребтов и занимают около 5 % территории ключевого участка.

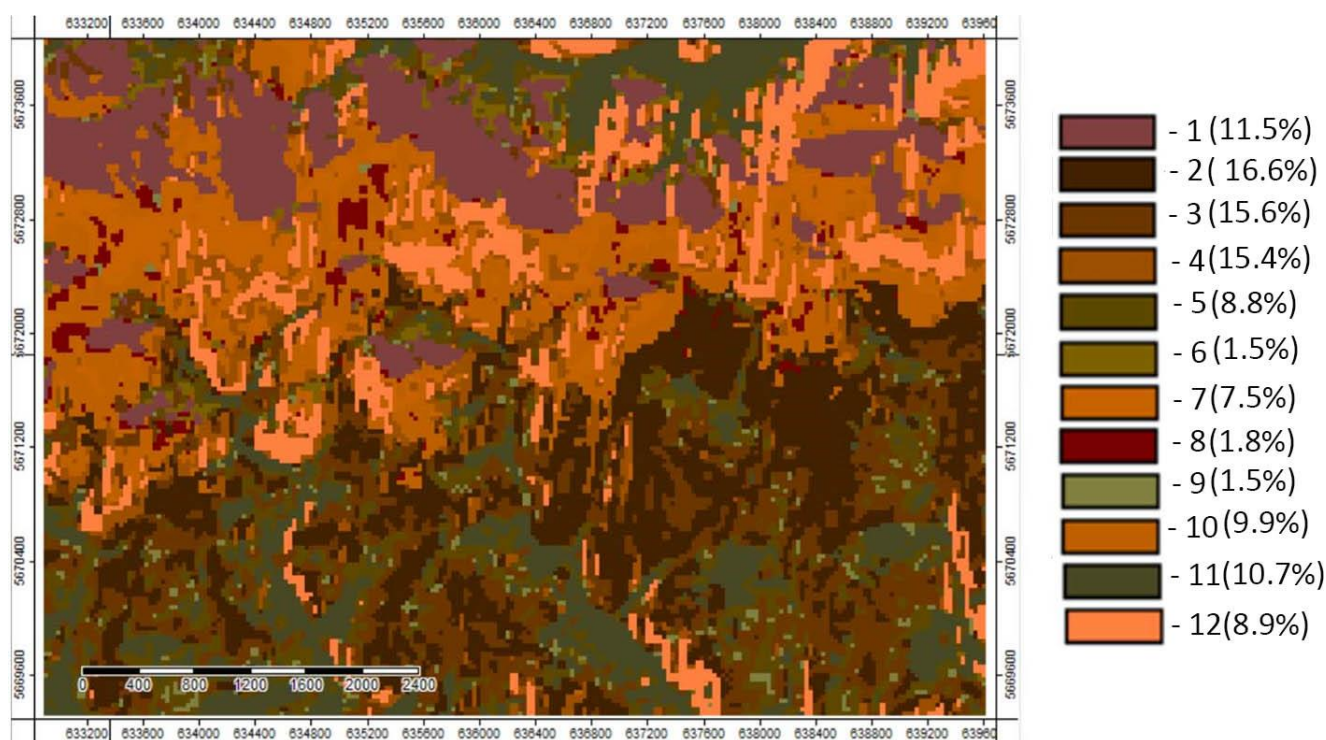
Около четверти территории занимают леса, тяготеющие к пологим тенистым склонам. Среди них преобладают лиственничные леса, занимающие около 12 % от общей площади. По своему составу и структуре они близки к парковым типам, характерным для Центрального Алтая [Огуреева, 1980]. Небольшая сомкнутость древостоя (0,3–0,5), достаточно разреженный подлесок, в котором доминирует *Rosa acicularis*, травостой с доминированием мезофитных злаков и разнотравья характеризуют лиственничные леса ключевого участка. Небольшими фрагментами, имея четкую приуроченность к нижним частям долин и межгорным понижениям, встречаются осиновые леса. Для них характерен сомкнутый кустарниковый ярус с развитием *Padus avium* Mill., *Caragana arborescens*, *Rosa acicularis*. В травостое доминируют *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv., *Carex macroura* Meinsh. с участием мезо-гигрофитного высокотравья.

Наименьшую площадь на ключевом участке (2 %) занимают луговые степи двух основных формаций: овсецовой (*Helictotrichon altaicum* Tzvelev) и стоповидноосоковой (*Carex pediformis* С.А. Mey.), занимающих примерно одинаковую площадь. Благоприятные для развития степей условия складываются на крутых световых и каменистых склонах, которые характеризуются повышенной теплообеспеченностью и наименьшим увлажнением. В видовом составе сообществ, имеющих высокую насыщенность (до 30 видов сосудистых растений и более),

преобладают лугово-степные элементы (*Pulsatilla multifida* (Pritz.) Juz., *Aster alpinus* L., *Bupleurum multinerve* DC.).

### Карта комбинаций почв

Полученные пространственные модели организации почвенного покрова горной лесостепи Алтая (рис. 4) согласуются с литературными данными [Петров, 1952; Карманов, 1959; Почвы..., 1959; Ковалев и др., 1973; Черных, Золотов, 2015].



**Рис. 4. Почвенный покров ключевого участка с указанием площадей (в процентах), занимаемых каждой комбинацией почв**

1 – комбинация серых, темногумусовых почв и литоземов (СерТЛит); 2 – комбинация черноземов глинисто-иллювиальных и квазиглеевых (Чгл-илЧквг); 3 – комбинация черноземов глинисто-иллювиальных, черноземов квазиглеевых и темногумусовых почв (Чгл-илЧквгТ); 4 – комбинация черноземов глинисто-иллювиальных, темногумусовых почв и литоземов (Чгл-илТЛит); 5 – комбинация черноземов квазиглеевых, темногумусовых глеевых и черноземов глинисто-иллювиальных (ЧквгТгЧгл-ил); 6 – комбинация черноземов квазиглеевых, литоземов и темногумусовых почв (ЧквгЛитТ); 7 – комбинация черноземов, темногумусовых почв и литоземов (ЧкарбТЛит); 8 – комбинация темногумусовых почв, черноземов глинисто-иллювиальных и стратоземов (ТЧгл-илСтр); 9 – комбинация темногумусовых, темногумусовых глеевых почв и стратоземов (ТТгСтрат); 10 – комбинация темногумусовых почв, литоземов и стратоземов (ТЛитСтр); 11 – комбинация темногумусовых глеевых, черноземов квазиглеевых и черноземов глинисто-иллювиальных (ТгЧквгЧгл-ил); 12 – комбинация литоземов и темногумусовых почв (ЛитТ)

**Fig. 4. Soil cover of the key site with the areas (in percent) occupied by soil combinations**

1 – combination of Greyzemic Chernozems, Cambisols and Rendzic Leptosols; 2 – combination of Chernic Phaeozems, and Gleyic Chernozems; 3 – combination of Chernic Phaeozems, Gleyic Chernozems and Cambisols; 4 – combination of Chernic Phaeozems, Cambisols and Rendzic Leptosols; 5 – combination of Gleyic Chernozems, Cambisols and Chernic Phaeozems; 6 – combination of Chernic Phaeozems, Rendzic Leptosols and Cambisols; 7 – combination of Haplic Chernozems, Cambisols and Rendzic Leptosols; 8 – combination of Cambisols, Chernic Phaeozems and Novic Retisols; 9 – combination of Cambisols, Gleyic Cambisols and Novic Retisols; 10 – combination of Cambisols, Rendzic Leptosols and Novic Retisols; 11 – combination of Cambisols, Gleyic Chernozems and Chernic Phaeozems; 12 – combination of Rendzic Leptosols and Cambisols

Повышенное увлажнение территории обуславливает преобладание комбинаций почв с высокой долей переувлажненных почв – черноземов квазиглеевых и темногумусовых глеевых почв, а также явное преобладание черноземов глинисто-иллювиальных (с глубоким залеганием или отсутствием аккумулятивно-карбонатного горизонта) над черноземами, несмотря на исходную карбонатность почвообразующих пород. Горный рельеф способствует широкому развитию слаборазвитых почв в составе комбинаций почв – литоземов и темногумусовых. В целом на долю комбинаций с преобладанием слаборазвитых почв приходится около трети от площади всего ключевого участка. Две трети заняты комбинациями с доминированием полнопрофильных почв: черноземов глинисто-иллювиальных, черноземов квазиглеевых, серых почв и черноземов. Стратоземы имеют ограниченное распространение и главным образом приурочены к днищам крупных ложбин.

В составе почвенного покрова исследуемой территории абсолютно преобладают черноземы глинисто-иллювиальные и черноземы квазиглеевые. Эти почвы являются наиболее универсальными компонентами в составе почвенного покрова ключевого участка и могут сочетаться как с другими полнопрофильными, так и со слаборазвитыми почвами, однако чаще всего встречаются вместе. Суммарная доля комбинаций почв ЧгиЧквг и ЧгиЧквгТ составляет около трети от площади всего ключевого участ-

ка. При этом черноземы квазиглеевые и литоземы одновременно не присутствуют в составе ни одной из комбинаций почв.

Серые почвы и черноземы характеризуются выраженной экспозиционной приуроченностью: комбинации почв ЛТЛит распространены на верхних и средних частях склонов, ЧквгЛТ – на нижних частях склонов северных экспозиций, комбинации почв ЧТЛит приурочены к склонам южных экспозиций. На вершинах сопков, а также на наиболее крутых участках склонов преобладают комбинации литоземов и темногумусовых почв. В ложбинах (как крупных – между сопков, так и малых, прорезающих склоны сопков) чаще всего встречаются комбинации почв с высокой долей черноземов квазиглеевых и темногумусовых глеевых почв (ТгЧквгЧги и ЧквгТгЧги), что обусловлено дополнительным притоком влаги с поверхностным и внутрпочвенным стоком.

### Карта рельефа

Горный рельеф ключевого участка характеризуется преобладанием пологих склонов и склонов средней крутизны нейтральной (западной и восточной) экспозиции (рис. 2, табл. 2). Южные склоны встречаются чаще, чем северные. На долю выровненных участков приходится менее 10 %. Крутые склоны занимают территорию в 23 % от всего ключевого участка.

Таблица 2

Доли площади, занимаемые участками разной экспозиции и угла наклона склона

Table 2

Areas (in percent) of key site with different exposition and slopes

| Экспозиция  | Угол наклона |      |       |      |
|-------------|--------------|------|-------|------|
|             | 0–3°         | 3–8° | 8–15° | >15° |
| Теневая     | 1,3          | 4,6  | 7,7   | 4,5  |
| Световая    | 2,8          | 10,2 | 9,8   | 5,4  |
| Нейтральная | 3,8          | 16,2 | 20,2  | 13,4 |

### Карта экосистем

Полученная картографическая модель характеризует пространственную организацию почвенного и растительного покровов лесостепного пояса, определяя важную роль орографической структуры в смене почв и растительных сообществ (рис. 5). Преобладающими на ключевом участке являются экосистемы с участием карагановых сообществ на комбинациях с высокой долей переувлажненных почв (темногумусовых глеевых, черноземов квазиглеевых) склонов разной крутизны преимущественно нейтральных и южных экспозиций. Карагановые сообщества также формируются на комбинациях с участием серых

почв (преимущественно на склонах северной экспозиции), темногумусовых и литоземов, однако такие экосистемы занимают сравнительно небольшие ареалы от площади ключевого участка.

Ежовые и кустовые разнотравные луга, формирующиеся преимущественно на комбинации черноземов глинисто-иллювиальных и черноземов квазиглеевых, а также комбинациях с участием темногумусовых почв, литоземов и стратоземов на плакорах и склонах разной крутизны и экспозиции, занимают вторые и третьи места по площади в пределах ключевого участка. Ежовые луга, в отличие от кустовых, могут формироваться на любых комбинациях почв, выделенных в пределах ключевого участка; кустово-

вые сообщества не формируются на комбинациях с участием серых почв.

Лиственничные леса, формирующиеся на комбинации серых, темногумусовых почв и литоземов на склонах разной крутизны преимущественно северной экспозиции, реже – нейтральной, занимают около 8 % от территории ключевого участка. Лиственничные леса также произрастают на других комбинациях почв (например, с участием черноземов и стратифицированных почв), однако ареалы этих экосистем занимают весьма ограниченные участки.

Шиповниковые сообщества всегда приурочены к комбинациям с участием слаборазвитых почв (темногумусовых и литоземов) и никогда не формируются на участках с переувлажненными почвами – темногумусовыми глеевыми и черноземами квазиглеевыми, а также на комбинациях с серыми почвами. Эти сообщества формируются на склонах нейтральных и южных экспозиций разной крутизны. В целом площадь всех экосистем с участием шиповниковых сообществ приблизительно равна площади экосистем лиственничных лесов.

Как и шиповниковые, кизильниковые и спирейные сообщества приурочены к комбинациям почв с высокой долей литоземов и не встречаются на переувлажненных и серых почвах; однако в отличие от шиповниковых кизильниковые формируются исключительно на склонах южной экспозиции при углах наклона более 8°, спирейные – на крутых склонах (при углах наклона более 15°) северной и нейтральной экспозиции.

Мелколиственные осиновые и березовые леса занимают очень небольшие территории в пределах ключевого участка (менее 2 %) и приурочены к склонам нейтральных экспозиций. Березовые леса формируются либо на выровненных участках и пологих склонах на комбинациях почв с участием черноземов, темногумусовых почв и литоземов, либо на крутых склонах (угол наклона более 15°) на темногумусовых почвах, литоземах и стратоземах. Осиновые леса формируются только на склонах с углом наклона более 8° на комбинациях с высокой долей переувлажненных почв (темногумусовых глеевых и черноземов квазиглеевых).

Помимо осиновых лесов, строгой приуроченностью к определенной комбинации почв, углом наклона и экспозиции склона характеризуются вейниковые луга, овсецовые и стоповидноосоковые луговые степи. Вейниковые сообщества встречаются исключительно на выровненных участках и пологих склонах южной и нейтральной экспозиций на черноземах глинисто-иллювиальных и квазиглеевых и занимают около 4 % от всей площади ключевого участка. Суммарная площадь луговых степей на

ключевом участке составляет менее 2 %; они все приурочены к склонам южной экспозиции. Овсецовые степи формируются на комбинации почв с участием черноземов, темногумусовых почв и литоземов на склонах небольшой крутизны (3–8°). Стоповидноосоковые (*Carex pediformis*), в отличие от овсецовых, формируются на склонах большей крутизны (более 8°) и бескарбонатных почвах (комбинация черноземов глинисто-иллювиальных и квазиглеевых).

Таким образом, региональная специфичность пространственной структуры экосистем в условиях влажного климата наветренной части Алтайской горной страны [Поликарпов и др., 1986; Модина, 1997] проявляется в доминировании мезофильных луговых и кустарниковых сообществ, а также в развитии мелколиственных и светлехвойных лесов на комбинациях почв с высокой долей черноземов квазиглеевых, темногумусовых глеевых почв и черноземов глинисто-иллювиальных в условиях лесостепи. В целом возможности индикации компонентного состава почвенного покрова по растительности невелики: четкой приуроченностью к определенным комбинациям почв характеризуются только осиновые леса, вейниковые луга, овсецовые и стоповидноосоковые степи. Суммарная площадь таких экосистем на ключевом участке составляет менее 10 %. Вместе с тем анализ компонентного состава экосистем ключевого участка позволяет выделить нехарактерные для участка сочетания, например: кизильниковые, кустовые, вейниковые, овсецовые и стоповидноосоковые сообщества никогда не встречаются на комбинациях почв, в составе которых присутствуют серые почвы; березовые леса и кизильниковые, шиповниковые луговые и лугово-степные сообщества не формируются на черноземах квазиглеевых; осиновые леса, вейниковые луга, спирейные луговые и лугово-степные сообщества не произрастают на комбинациях с участием черноземов. В целом в наиболее широком диапазоне почвенных условий произрастают ежовые разнотравные луга и лиственничные леса, равно как и на комбинации почв литоземов с темногумусовыми почвами и комбинации черноземов глинисто-иллювиальных, темногумусовых почв и литоземов встречается наибольшее разнообразие растительных сообществ.

Верификация полученной цифровой карты экосистем проведена на основании сравнения с ландшафтной картой [Черных, Золотов, 2015] (рис. 6). Эти карты характеризуются близкими масштабами: масштаб ландшафтной карты 1:250 000, пространственное разрешение карты экосистем составляет 30 × 30 м, что, исходя из проводимых исследований



| Экосистемы | Растительность                                  | Почвенные комбинации | Склоны |   |     |
|------------|-------------------------------------------------|----------------------|--------|---|-----|
|            | Светлохвойные и мелколиственные леса            |                      | N      | S | E-W |
| 1          | Лиственничные ( <i>Larix sibirica</i> )         | СерТЛит              |        |   |     |
| 2          |                                                 | ЧкарбТЛит            |        |   |     |
| 3          |                                                 | ТЛитСтр              |        |   |     |
| 4          |                                                 | ЛитТ                 |        |   |     |
| 5          | Березовые ( <i>Betula pendula</i> )             | ЧкарбТЛит            |        |   |     |
| 6          |                                                 | ТЛитСтр              |        |   |     |
| 7          | Осиновые ( <i>Populus tremula</i> )             | ТгЧквгЧгл-ил         |        |   |     |
|            | Разнотравные луга                               |                      |        |   |     |
| 8          | Костровые ( <i>Bromus squarrosus</i> )          | Чгл-илЧквгТ          |        |   |     |
| 9          |                                                 | ТЛитСтр              |        |   |     |
| 10         |                                                 | ЧквгТгЧгл-ил+Чкарб   |        |   |     |
| 11         | Вейниковые ( <i>Calamagrostis arundinacea</i> ) | Чгл-илЧквг           |        |   |     |
| 12         | Ежовые ( <i>Dactylis glomerata</i> )            | ТЧгл-илСтр           |        |   |     |
| 13         |                                                 | ЧквгТгЧгл-ил+Чкарб   |        |   |     |
| 14         |                                                 | ТЛитСтр              |        |   |     |
| 15         |                                                 | СерТЛит              |        |   |     |
| 16         |                                                 | Чгл-илЧквг           |        |   |     |
| 17         |                                                 | Чгл-илЧквгТ          |        |   |     |
| 18         |                                                 | ТгЧквгЧгл-ил         |        |   |     |

|    | Кустарниковые луговые и лугово-степные сообщества          |                    |  |  |  |
|----|------------------------------------------------------------|--------------------|--|--|--|
| 19 | Карагазовые ( <i>Caragana arborescens</i> )                | Чгл-илЧквг         |  |  |  |
| 20 |                                                            | ЧквгТгЧгл-ил+Чкарб |  |  |  |
| 21 |                                                            | СерТЛит            |  |  |  |
| 22 |                                                            | Чгл-илТЛит         |  |  |  |
| 23 |                                                            | ТТгСтрат           |  |  |  |
| 24 |                                                            | ЧквгСерТ           |  |  |  |
| 25 |                                                            | Чгл-илЧквгТ        |  |  |  |
| 26 |                                                            | ТгЧквгЧгл-ил       |  |  |  |
| 27 |                                                            | ЛитТ               |  |  |  |
| 28 | Кизильниковые ( <i>Cotoneaster melanocarpa</i> )           | ЧкарбТЛит          |  |  |  |
| 29 |                                                            | ЛитТ               |  |  |  |
| 30 | Шиповниковые ( <i>Rosa acicularis</i> )                    | ЧкарбТЛит          |  |  |  |
| 31 |                                                            | ТЛитСтр            |  |  |  |
| 32 | Спирейные ( <i>Spiraea crenata</i> , <i>S. trilobata</i> ) | ЛитТ+Чгл-ил        |  |  |  |
| 33 |                                                            | ЛитТ               |  |  |  |
|    | Луговые степи                                              |                    |  |  |  |
| 34 | Стопovidноосоковые ( <i>Carex pediformis</i> )             | Чгл-илЧквг         |  |  |  |
| 35 | Овсцовые ( <i>Helictotrichon altaicum</i> )                | ЧкарбТЛит          |  |  |  |

| Склоны |                            |
|--------|----------------------------|
|        | Полотие                    |
|        | Полотие и средней крутизны |
|        | Средней крутизны           |
|        | Средней крутизны и крутые  |
|        | Крутые                     |
|        | Разной крутизны            |

Рис. 5. Карта экосистем ключевого участка  
Комбинации почв – см. рис. 4.

Fig. 5. Ecosystem map of the key site

Vegetation – see fig. 3. Soil combinations – see fig. 4.

N – slopes of northern exposition, S – slopes of southern exposition, E-W – slopes of western and eastern expositions. Slopes: flat; flat and medium steep; medium steep; medium steep and steep; steep; different steep.

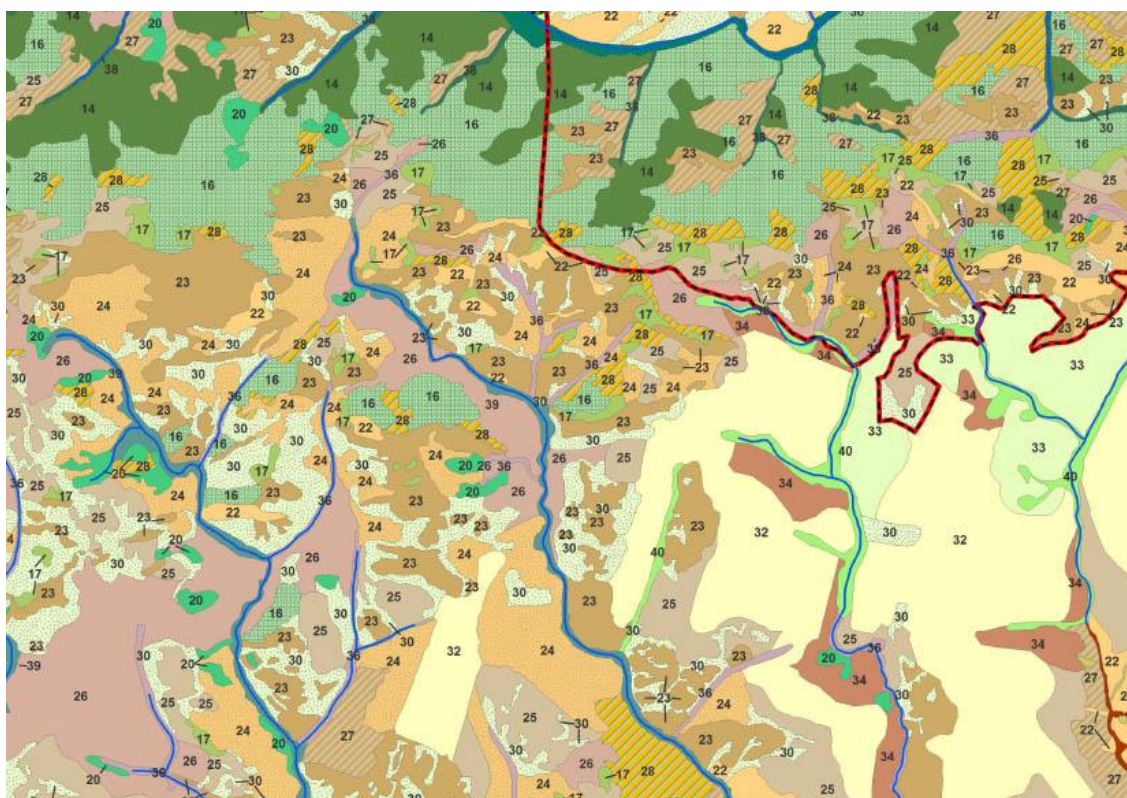
при некоторых нормативных требованиях [Аникеева, Кадничанский, 2017], примерно соответствует масштабу 1:200 000. Более мелкий масштаб ландшафтной карты в сравнении с картой экосистем предполагает использование более крупных природно-территориальных единиц в качестве объектов картографирования, чем использованный нами в работе; картографической единицей ландшафтной карты являются урочища – сочетания генетически и пространственно взаимосвязанных, однородных по литологии, условиям увлажнения фаций в пределах части или целой мезоформы рельефа [Черных, Золотов, 2015]. Некоторые урочища образованы растительными сообществами разных типов: например, на карте выделены разреженные березовые леса в сочетании с остепненными злаково-разнотравными лугами или листвен-

ничные леса в сочетании с послелесными кустарниками и высокотравьем и др. Информация по почвам в ландшафтной карте дана в виде комбинаций почв (как на составленной нами карте экосистем).

На ландшафтной карте, соответствующей ключевому участку исследований, встречается 22 урочища. Компонентный состав урочищ в целом соответствует компонентному составу выделенных экосистем. Так, например, лиственничные леса произрастают на комбинациях с преобладанием серых почв, преимущественно на склонах теневых экспозиций разной крутизны. Ежовые луга произрастают в широком спектре экологических условий – как с точки зрения рельефа, так и почв, однако преобладающими являются комбинации черноземов глинисто-иллювиальных и квазиглеевых на склонах южных

и нейтральных экспозиций с углом наклона склона до 20°. Карагановые луговые и лугово-степные сообщества часто приурочены к комбинациям почв с преобладанием черноземов квазиглеевых на склонах разной крутизны преимущественно нейтральной экспозиции. Овсцовые сообщества занимают склоны южной экспозиции и формируются на литоземах, темногумусовых почвах и черноземах. На карте экосистем, в отличие от ландшафтной карты, отсутствуют природно-территориальные комплексы, соответствующие долинам малых рек, с преобладанием заболоченных разнотравно-осоковых лугов и при-

русовых ивняков на аллювиальных и стратифицированных почвах. Их отсутствие обусловлено, во-первых, небольшой площадью (на ландшафтной карте эти урочища занимают около 1,5 % от площади ключевого участка), во-вторых особенностями пространственного рисунка – вытянутостью вдоль малых линейных водотоков с шириной менее 30 м; используемый цифровой подход и входные параметры ДЗЗ (пространственное разрешение пикселя 30 × 30 м), небольшое распространение и особенности пространственного положения не позволили выделить такие экосистемы.



**Рис. 6. Фрагмент карты ландшафтов Тигирекского заповедника**  
 Легенда – см.: [Черных, Золотов, 2015]

**Fig. 6. Fragment of the landscape map of the Tigirek reserve**  
 Legend from [Chernykh, Zolotov, 2015]

Как и на карте экосистем, преобладающими являются природно-территориальные комплексы с кустарниковыми луговыми и лугово-степными сообществами на черноземах глинисто-иллювиальных, черноземах квазиглеевых, черноземах и темногумусовых почвах.

Затем следуют разнотравные луга, главным образом ежовые, формирующиеся на широком спектре почв. Лиственный сообщества, встречающиеся преимущественно на серых почвах и склонах теневых экспозиций, являются преобладающими среди

выделенных лесных сообществ и уступают по своей площади урочищам с кустарниковой и луговой растительностью. Степи, представленные главным образом овсцовыми сообществами на литоземах, черноземах и темногумусовых почвах, занимают наименьшую площадь на ключевом участке. Кроме того, отсутствуют высокотравные сообщества как отдельная типологическая группа; сообщества с участием высокотравья, индицирующего условия повышенного увлажнения в местообитаниях пологих склонов, включены в состав лугов и кустарниковых

сообществ, которые характеризуют в целом высокую влагообеспеченность на ключевом участке.

Анализ пространственного положения природно-территориальных комплексов, выделенных на ландшафтной карте и карте экосистем с близким компонентным составом, показывает высокую долю совпадения. С учетом гетерогенности состава урочищ, т.е. одновременного присутствия в некоторых контурах ландшафтной карты лесных, луговых и кустарниковых сообществ, частичное совпадение компонентного состава ландшафтной карты и карты экосистем наблюдается для 93 % территории.

### Заключение

Анализ пространственной структуры экосистем лесостепного пояса Западного Алтая, выполненный на основе цифрового картографирования с применением многомерного анализа дистанционных данных и полевых описаний почв и растительности, позволяет сформулировать следующие выводы:

- на основании моделей растительно- и почвенно-ландшафтных связей Драгунского плато выявлено, что абсолютная высота явилась общим фактором пространственной дифференциации компонентов почвенного и растительного покрова. Для почв дополнительными факторами явились угол наклона, экспозиция и значения показателя яркости (по снимку Landsat 5 за октябрь 2011), для растительности – расширенный вегетационный индекс (по снимку Landsat 8 за август 2014), показатель влажности (по снимку Landsat 8 за август 2014) и показатель яркости (по снимку Landsat 8 за февраль 2015). Общая точность моделей составляет 73 % для растительного покрова и 64 % для почвенного покрова;

- фоновую роль в растительном покрове лесостепного пояса играют кустарниковые заросли и разнотравные луга, среди которых преобладают карагановые сообщества и ежовые луга, занимающие суммарно почти половину от общей площади ключевого участка.

Собственно, степи имеют локальное распространение, характеризуя региональные особенности лесостепного пояса Западного Алтая, формирующегося в условиях повышенного увлажнения. Это находит отражение и в структуре экосистем, в составе которых преобладают экосистемы карагановых сообществ на комбинациях с высокой долей переувлажненных почв (темногумусовые глеевые, черноземы квазиглеевые) и ежовых и костровых разнотравных лугов, формирующихся на комбинациях черноземов глинисто-иллювиальных и квазиглеевых;

- анализ компонентного состава экосистем свидетельствует об ограниченной возможности индикации компонентов почвенного покрова по растительности: четкой приуроченностью к определенным комбинациям почв характеризуются только осиновые леса, вейниковые луга, овсецовые и стоповидноосоковые степи, а суммарная площадь таких экосистем на ключевом участке составляет менее 10 %. В наиболее широком диапазоне почвенных условий произрастают ежовые разнотравные луга и лиственных леса, равно как и на комбинации почв литоземов с темногумусовыми почвами и комбинации черноземов глинисто-иллювиальных, темногумусовых почв и литоземов встречается наибольшее разнообразие растительных сообществ;

- ландшафтная карта, полученная экспертным методом, и карта экосистем, выполненная на основе цифрового картографирования с применением многомерного анализа дистанционных данных и полевых описаний почв и растительности, характеризуются высокой степенью совпадения компонентного состава природно-территориальных комплексов и их пространственного положения. Соответствие результатов экспертного и цифрового картографирования открывает возможность создания карт экосистем сопредельных территорий со схожими факторами среды, в условиях отсутствия полевого опробования на основании полученных моделей растительно- и почвенно-ландшафтных связей.

### Список источников

- Алтайский край : атлас. М. ; Барнаул : ГУГК. 1978–1980.
- Аникеева И.А., Кадничанский С.А. Оценка фактической разрешающей способности аэро- и космических фотоснимков по пограничной кривой // Геодезия и картография. 2017. Т. 78, № 6. С. 25–36. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-924-6-25-36
- Бочарников М.В., Смирнова М.А. Парцеллярная структура среднетаежных плакорных биогеоценозов юго-востока Устьянского плато // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2019. № 3. С. 114–123.
- Бочарников М.В. Эколого-фитоценотическая структура лесного покрова северного макросклона Западного Саяна // Лесоведение. 2015. № 1. С. 10–19.
- Владыченский А.С. Особенности горного почвообразования. М. : Наука, 1998. 191 с.
- Давыдов Е.А., Бочкарёва Е.Н., Черных Д.В. Краткая характеристика природных условий Тигирекского заповедника // Труды Тигирекского заповедника. 2011. Вып. 4. С. 7–19.
- Карманов И.И. Почвы черноземной зоны засушливой, умеренно-засушливой и луговой степи предгорных равнин, предгорий и низкогорий Алтая // Почвы Алтайского края. М. : Изд-во АН СССР, 1959. С. 139–175.
- Киселев А.Н. Оценка и картографирование биологического разнообразия (на примере Приморья) // Геоботаническое картографирование. 2000. № 1998-2000. С. 3–15.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.

- Ковалев Р.В., Хмелев В.А., Волковинцев В.И. Почвы Горно-Алтайской автономной области. Новосибирск : Наука, 1973. 357 с.
- Котова Т.В., Огуреева Г.Н. Биогеографические подходы в экологическом картографировании // Геоботаническое картографирование. 2007. № 2007. С. 23–31.
- Куминова А.В. Растительный покров Алтая. Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1960. 450 с.
- Лашинский Н.Н. Растительность Салаирского кряжа. Новосибирск : Гео, 2009. 263 с.
- Лойко С.В., Герасько Л.И., Куликова О.Р. Сукцессии растительности на дерново-подзолистых почвах подтайги Томь-Яйского междуречья // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 4 (12). С. 32–43.
- Модина Т.Д. Климаты Республики Алтай. Новосибирск : НИУ, 1997. 186 с.
- Нешатаев Ю.Н. Методы анализа геоботанических материалов. Л. : Изд-во ЛГУ, 1987. 192 с.
- Огуреева Г.Н. Ботаническая география Алтая. М. : Наука, 1980. 192 с.
- Петров Б.Ф. Почвы Алтае-Саянской области. М., 1952. 245 с. (Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева; т. 2).
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1986. 225 с.
- Почвы Алтайского края. М. : Изд-во АН СССР, 1959. 382 с.
- Сорокина Н.П., Козлов Д.Н. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2009. № 2. С. 198–210.
- Сочава В.Б. Географические аспекты сибирской тайги. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1980. 256 с.
- Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М. : Прогресс, 1980. 327 с.
- Федоткина Н.В., Папина О.Н., Собчак Р.О. Структура растительности Майминско-Катунского междуречья (Республика Алтай) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2009. № 1 (5). С. 14–26.
- Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М. : Мысль, 1972. 423 с.
- Хорошев А.В. Факторы саморазвития пространственной структуры таежного ландшафта // География и природные ресурсы. 2004. № 4. С. 5–12.
- Черных Д.В., Золотов Д.В. Ландшафтная структура Ханхаринского, Тигирекского участков и охранный зоны государственного природного заповедника «Тигирекский» // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2015. № 2 (37). С. 16–28.
- Baig M.H.A., Lifu Z., Tong S., Qingxi T. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5 (5). P. 423–431.
- Blasi C., Capotorti G., Alos Orti M.M., Anzellotti I., Attorre F., Azzella M.M., Carli E., Copiz R., Garfi V., Manes F., Marando F., Marchetti M., Mollo B., Zavattero L. Ecosystem mapping for the implementation of the European Biodiversity Strategy at the national level: The case of Italy // Environmental Science and Policy. 2017. V. 78. P. 173–184. DOI: 10.1016/j.envsci.2017.09.002
- Broll G., Keplin B. Mountain ecosystems: studies in treeline ecology. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2005. 354 p.
- Dufour A., Gadallah F., Wagner H.H., Guisan A., Buttler A. Plant species richness and environmental heterogeneity in a mountain landscape: Effects of variability and spatial configuration // Ecography. 2006. V. 29 (4). P. 573–584. DOI: 10.1111/j.0906-7590.2006.04605.x
- Kauth R.J., Thomas G.S. The tasseled cap – A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat // Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 1976. Purdue University, West Lafayette, Indiana. P. 41–51.
- Kerr J.T., Ostrovsky M. From space to species: Ecological applications for remote sensing // Trends Ecol. Evolut. 2003. V. 18. P. 299–305.
- Kuchler A.W. Problems in classifying and mapping vegetation for ecological regionalization // Ecology. 1973. V. 54. P. 512–523.
- Malavasi M. The map of biodiversity mapping // Biological Conservation. 2020. V. 252. Art. 108843. DOI: 10.1016/j.biocon.2020.108843
- Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'Amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth // Bioscience. 2001. V. 51 (11). P. 933–938.
- Reddy C.S., Jha C.S., Diwakar P.G., Dadhwal V.K. Nationwide classification of forest types of India using remote sensing and GIS // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. V. 187 (777). DOI: 10.1007/s10661-015-4990-8
- Rocchini D., Foody G.M., Nagendra H., Ricotta C., Anand M., He K.S., Amici V., Kleinschmit B., Förster M., Schmidlein S., Feilhauer H., Ghisla A., Metz M., Neteler M. Uncertainty in ecosystem mapping by remote sensing // Computers and Geosciences. 2013. V. 50. P. 128–135. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.05.022
- Searle R., McBratney A., Grundy M., Kidd D., Malone B., Arrouays D., Stockman U., Zund P., Wilson P., Wilford J., Gool D.V., Triantafyllis J., Thomas M., Stower L., Slater B., Robinson N., Ringrose-Voase A., Padarian J., Payne J., Orton T., Odgers N., O'Brien L., Minasny B., McLean Bennett J., Liddicoat C., Jones E., Holmes K., Harms B., Gray J., Bui E., Andrews K. Digital soil mapping and assessment for Australia and beyond: A propitious future // Geoderma Regional. 2021. V. 24. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00359
- Vanselow K.A., Samimi C. Predictive mapping of dwarf shrub vegetation in an arid high mountain ecosystem using remote sensing and random forests // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 6709–6726. DOI: 10.3390/rs6076709

## References

- Altayskiy kray. Atlas [Altai region. Atlas]. Moscow: Barnaul: GUGK, 1978–1980. In Russian
- Anikeeva I.A., Kadnichanskiy S.A. Otsenka fakticheskoy razreshayushchey sposobnosti aero- i kosmicheskikh fotosnimkov po pogranichnoy krivoy [Estimation of the actual resolution of aerial and space photographs using the boundary curve] // Geodesy and Cartography. 2017. V. 1. No. 6. pp. 25–36. In Russian. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2017-924-6-25-36>

- Bocharnikov M.V., Smirnova M.A. *Partsellyarnaya struktura srednetaezhnykh plakornykh biogeotsenozov yugo-vostoka Ust'yanskogo plato* [Parcel structure of the middle taiga upland biogeocenoses in the South-Eastern of the Ustyansk plateau] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2019. No. 3. pp. 114–123. In Russian
- Bocharnikov M.V. *Ekologo-fitotsenoticheskaya struktura lesnogo pokrova severnogo makrosklona Zapadnogo Sayana* [Eco-Phytocenotic Structure of the Forest Cover on the Northern Macroslope of Western Sayan] // Lesovedenie. 2015. No. 1. pp. 10–19. In Russian
- Vladychenskiy A.S. *Osobennosti gornogo pochvoobrazovaniya* [Features of mountain soil formation]. Moscow : Nauka, 1998. 191 p. In Russian
- Davydov E.A., Bochkareva E.N., Chernykh D.V. *Kratkaya kharakteristika prirodnnykh usloviy Tigirekского zapovednika* [Natural conditions of the Tigirek Strict Nature Reserve] // Proceedings of the Tigirek State Natural Reserve. 2011. V. 4. pp. 7–19. In Russian
- Karmanov I.I. *Pochvy chernozemnoy zony zasushlivoy, umerenno-zasushlivoy i lugovoy stepi predgornyykh ravnin, predgoryi i nizkogoriy Altaya* [Soils of the chernozem zone of arid, moderately arid and meadow steppe of the foothill plains, foothills and low mountains of Altai] // Soils of the Altai Territory. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1959. pp. 139–175. In Russian
- Kiselev A.N. *Otsenka i kartografirovaniye biologicheskogo raznoobraziya (na primere Primor'ya)* [Evaluation and mapping of biodiversity (Primorye region)] // Geobotanical mapping. 2000. 1998–2000. pp. 3–15. In Russian
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk: Oykumena. 2004. 342 p. In Russian
- Kovalev R.V., Khmelev V.A., Volkovintser V.I. *Pochvy Gorno-Altayskoy avtonomnoy oblasti* [Soils of the Gorno-Altai Autonomous Region]. Novosibirsk: Nauka, 1973. 357 p. In Russian
- Kotova T.V., Ogureeva G.N. *Biogeograficheskie podkhody v ekologicheskom kartografirovani* [Biogeographic approaches to ecological mapping] // Geobotanical mapping. 2007. V. 2007. pp. 23–31. In Russian
- Kuminova A.V. *Rastitel'nyy pokrov Altaya* [Vegetation cover of Altai] // Novosibirsk: izd-vo SO AN SSSR, 1960. 450 p. In Russian
- Lashchinskiy N.N. *Rastitel'nost' Salairskogo kryazha* [Vegetation of the Salair Ridge]. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2009. 263 p. In Russian
- Loyko S.V., Geras'ko L.I., Kulikova O.R. *Suktsessii rastitel'nosti na dernovo-podzolistykh pochvakh podtaygi Tom'-Yayskogo mezhdurech'ya* [Successions vegetation on sod-podsol soils of a subtaiga of the Tom-Yaysky interfluvium] // Tomsk State University Journal of Biology. 2010. No. 4 (12). pp. 32–43. In Russian
- Modina T.D. *Klimaty Respubliki Altay* [The climates of the Altai Republic]. Novosibirsk: NIU, 1997. 186 p. In Russian
- Neshataev Yu.N. *Metody analiza geobotanicheskikh materialov* [Methods for the analysis of geobotanical materials]. Leningrad: Izd-vo LGU, 1987. 192 p. In Russian
- Ogureeva G.N. *Botanicheskaya geografiya Altaya* [Botanical geography of Altai]. Moscow : Nauka, 1980. 192 p. In Russian
- Petrov B.F. *Pochvy Altae-Sayanskoy oblasti* [Soils of the Altai-Sayan region]. Moscow: Trudy Pochv. in-ta im. V.V. Dokuchaeva. 1952. V. 2. 245 p. In Russian
- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I. *Klimat i gornye lesa Yuzhnoy Sibiri* [Climate and mountain forests of Southern Siberia]. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1986. 225 p. In Russian
- Pochvy Altayskogo kraya* [Soils of the Altai Territory]. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1959. 382 p. In Russian
- Sorokina N.P., Kozlov D.N. *Opyt tsifrovogo kartografirovaniya struktury pochvennogo pokrova* [Experience in digital mapping of soil cover patterns] // Eurasian Soil Science. 2009. No. 2. pp. 198–210. In Russian
- Sochava V.B. *Geograficheskie aspekty sibirskoy taygi* [Geographic aspects of the Siberian taiga]. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1980. 256 p. In Russian
- Uittek R. *Soobshchestva i ekosistemy* [Communities and ecosystems]. Moscow: Progress, 1980. 327 p. In Russian
- Fedotkina N.V., Papina O.N., Sobchak R.O. *Struktura rastitel'nosti Mayminsko-Katun'skogo mezhdurech'ya (Respublika Altay)* [Vegetation structure of the Mayminsko-Katun'sky interfluvium (Altai Republic)] // Tomsk State University Journal of Biology. 2009. No. 1 (5). pp. 14–26. In Russian
- Fridland V.M. *Struktura pochvennogo pokrova* [Soil cover structure]. Moscow: Mysl', 1972. 423 p. In Russian
- Khoroshev A.V. *Faktory samorazvitiya prostranstvennoy struktury taezhnogo landshafta* [Factors of self-development of the spatial structure of the taiga landscape] // Geography and Natural Resources. 2004. No. 4. pp. 5–12. In Russian
- Chernykh D.V., Zolotov D.V. *Landshaftnaya struktura Khankharinskogo, Tigirek'skogo uchastkov i okhrannoy zony gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Tigirek'skiy»* [Landscape structure of the Khankharinsky and Tigireksky areas and buffer zone of the Tigirek strict nature reserve] // Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2015. No. 2 (37). pp. 16–28. In Russian
- Baig M.H.A., Lifu Z., Tong S., Qingxi T. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5(5). pp. 423–431.
- Blasi C., Capotorti G., Alos Orti M.M., Anzellotti I., Attorre F., Azzella M.M., Carli E., Copiz R., Garfi V., Manes F., Marando F., Marchetti M., Mollo B., Zattero L. Ecosystem mapping for the implementation of the European Biodiversity Strategy at the national level: The case of Italy // Environmental Science and Policy. 2017. V. 78. pp. 173–184. doi.org/10.1016/j.envsci.2017.09.002
- Broll G., Keplin B. *Mountain ecosystems: studies in treeline ecology*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. 354 p.
- Dufour A., Gadallah F., Wagner H. H., Guisan, A., Buttler A. Plant species richness and environmental heterogeneity in a mountain landscape: Effects of variability and spatial configuration // Ecography. 2006. V. 29(4). pp. 573–584. doi.org/10.1111/j.0906-7590.2006.04605.x
- Kauth R.J., Thomas G.S. The tasseled cap – A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat // Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 1976. Purdue University, West Lafayette, Indiana. pp. 41–51.
- Kerr J.T., Ostrovsky M. From space to species: Ecological applications for remote sensing // Trends Ecol. Evolut. 2003. V. 18. pp. 299–305.
- Kuchler A.W. Problems in classifying and mapping vegetation for ecological regionalization // Ecology. 1973. V. 54. pp. 512–523.

- Malavasi M. The map of biodiversity mapping. *Biological Conservation*. 2020. V. 252. 108843. doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108843
- Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'Amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth // *Bioscience*. 2001. No. 51 (11). pp. 933–938.
- Reddy C.S., Jha C.S., Diwakar P.G., Dadhwal V.K. Nationwide classification of forest types of India using remote sensing and GIS // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. V. 187. No. 777. doi.org/10.1007/s10661-015-4990-8
- Rocchini D., Foody G.M., Nagendra H., Ricotta C., Anand M., He K.S., Amici V., Kleinschmit B., Förster M., Schmidtlein S., Feilhauer H., Ghisla A., Metz M., Neteler M. Uncertainty in ecosystem mapping by remote sensing // *Computers and Geosciences*. 2013. V. 50. pp. 128–135. doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.022
- Searle R., McBratney A., Grundy M., Kidd D., Malone B., Arrouays D., Stockman U., Zund P., Wilson P., Wilford J., Gool D.V., Triantafyllis J., Thomas M., Stower L., Slater B., Robinson N., Ringrose-Voase A., Padarian J., Payne J., Orton T., Odgers N., O'Brien L., Minasny B., McLean Bennett J., Liddicoat C., Jones E., Holmes K., Harms B., Gray J., Bui E., Andrews K. Digital soil mapping and assessment for Australia and beyond: A propitious future // *Geoderma Regional*. 2021. V. 24. doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00359
- Vanselow K.A., Samimi C. Predictive mapping of dwarf shrub vegetation in an arid high mountain ecosystem using remote sensing and random forests // *Remote Sensing*. 2014. 6. pp. 6709–6726. doi.org/10.3390/rs6076709

**Информация об авторах:**

**Смирнова М.А.**, кандидат географических наук, доцент, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; старший научный сотрудник, отдел агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия.

E-mail: summerija@yandex.ru

**Бочарников М.В.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, кафедра биогеографии, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

E-mail: maxim-msu-bg@mail.ru

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**Information about the authors:**

**Smirnova M.A.**, Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Faculty of Geography, M.V. Lomonosov Moscow State University; Senior Researcher, Department of agro-ecological soil assessment agricultural landscapes design, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia.

E-mail: summerija@yandex.ru

**Bocharnikov M.V.**, Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Department of Biogeography, Faculty of Geography, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

E-mail: maxim-msu-bg@mail.ru

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

*Статья поступила в редакцию 29.04.2021; одобрена после рецензирования 02.11.2021; принята к публикации 14.06.2022*

*The article was submitted 29.04.2021; approved after reviewing 02.11.2021; accepted for publication 14.06.2022*