

## Анализ роли рельефа в пространственной дифференциации ландшафтов с использованием геоинформационных и статистических методов

Н. В. ПОМАЗКОВА, В. Ю. АБАКУМОВА

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН  
672014, Чита, ул. Недорезова, 16а, а/я 1032  
E-mail: naste2@yandex.ru, faith-sh@mail.ru*

Статья поступила 30.03.2017

Принята к печати 07.08.2017

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены закономерности взаимосвязей рельефа и пространственной организации ландшафтов двух иерархических уровней (урочищ и групп урочищ). С использованием геоинформационных методов по цифровой модели рельефа бассейна малой реки получен ряд основных параметров рельефа, наиболее значимых для ландшафтов. Выявление взаимосвязей проводилось с помощью дискриминантного анализа. Наибольший вклад в дискриминацию ландшафтных единиц вносит абсолютная высота. Уклон определенной экспозиции более значим для дискриминации урочищ, стандартное отклонение уклона – для дискриминации групп урочищ. Последнее совместно с профильной кривизной, а также индекс влажности, значимы при вычленении долинных геосистем. Тем же методом проанализирована температура воздуха вегетационного периода как фактора, дифференцирующего условия местоположения ландшафтных единиц. Долинные геосистемы группируются как более холодные, а пирогенный участок – как имеющий наибольшие амплитуды температур.

**Ключевые слова:** ландшафты, цифровая модель рельефа, дискриминантный анализ.

При изучении рельефа как одного из главных составляющих морфолитоогенной основы ландшафтов и влияющего на природные процессы (климат, режим увлажнения, мерзлотные процессы и др.) все чаще используются цифровые модели рельефа (ЦМР), что облегчает вычисления многочисленных морфометрических характеристик. Множество параметров и индексов, получаемых из ЦМР, широко применяются как в комплексных ландшафтных [Ерофеев, 2012; Кузьмин и др.,

2012] и экосистемных исследованиях [Шарый, 2016], так и в компонентных: геоморфологических [Romstad, Eitzelmüller, 2009], геоботанических [Fanguan et al., 2015], почвенных [Флоринский, 2010].

Ландшафтная структура Забайкалья отличается своеобразными чертами. Взаимопроникновение природных систем трех крупных природных областей (Южно-Сибирской горной, Байкало-Джугдзурской горнотаежной, Центрально-азиатской пустынно-степной [Ат-

лас..., 1967]) составляет существенную черту ландшафтной структуры и является уникальным ландшафтно-ситуационным признаком всего региона. Появление в близком соседстве лиственнично-таежных и степных природных комплексов связано с проявлением “котловинного эффекта”, формирующегося на общем фоне высотной поясности и континентальности климата [Михеев, 1993]. Существенный вклад в разнообразие природных комплексов региона вносит переходная полоса – горная лесостепь Даурии, шириной до 200 км, где чередование леса и степи зависит от орографических условий перераспределения тепла и влаги [Дулепова, 1993]. Горный рельеф способствовал сохранению реликтовой растительности различных геологических эпох, а в роли рефугиумов часто выступают элементы рельефа: широкие хорошо прогреваемые речные поймы и подошвы южных склонов сопок – для биоты более теплых эпох, верхние части склонов с щебнистыми почвами – для ксерофитных травянистых сообществ и некоторых видов холодных высокогорных степей – реликтов гляциальных эпох [Корсун, Гилева, 2009].

Физико-географические и геоморфологические условия предопределили характерные черты ландшафтов региона, а также зависимость их от относительного положения в системе “долина – склоны – водоразделы” [Плюснин, 2003]. Для Забайкалья остаются мало изученными природные системы топологического уровня, являющиеся ключевыми элементами с точки зрения отклика природных систем на изменения окружающей среды, и, таким образом, исследование их пространственной дифференциации, взаимосвязей, устойчивости и адаптации к гидротермическим условиям местообитаний, а также поиск новых методов, особенно дистанционных и комплексных [Хорошев и др., 2010] актуально.

Цель данной работы – выявить и количественно оценить взаимосвязь рельефа и пространственной дифференциации ландшафтов. Объект исследования выбран исходя из наличия возможно большего разнообразия природных комплексов на относительно ограниченной территории в пределах речного бассейна как единой природной системы [Жорытский, 2001].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объект исследования – бассейн р. Кадалинка в Забайкальском крае (длина реки 23 км, площадь бассейна – около 92 км<sup>2</sup>). Истоки реки находятся вблизи г. Чита на макросклоне Яблонового хребта, а устьевая часть – в пределах городской черты, в Читино-Ингодинской впадине (рис. 1, а). Яблоновый хребет относится к средневысотным горам с расчлененными склонами, мягкими очертаниями гребневой линии и уплощенными вершинами водоразделов. Читино-Ингодинская впадина представляет собой односторонний грабен, развивавшийся в зоне Чикойско-Ингодинского глубинного разлома, и имеет сложное геологическое строение с серией мульдообразных опусканий и блоковых поднятий [Мезозойская тектоника..., 1975]. Вдоль северо-западного борта впадины проходит тектонический уступ, отчетливо выраженный в рельефе. Река Кадалинка относится к малым рекам, ранее – это приток р. Ингода, в настоящее время впадает в оз. Кенон из-за искусственного поворота русла (рис. 1, б).

Распределение высот в бассейне отличается от нормального за счет преобладания низких (до 750 м) и высоких (1000–1150 м) областей (табл. 1; см. рис. 1, б). Это отражает особенности его рельефа (широкое и плоское днище впадины и обширные пространства хребта), что проявляется и в распределении уклонов: треть бассейна – это плоские и очень пологие пространства днища впадины, долин водотоков и вершин водоразделов (см. табл. 1). Наиболее крутые склоны приурочены к среднему течению и ориентированы на юго-запад и северо-восток. Южных склонов (особенно юго-восточных) больше, чем северных (см. табл. 1).

Климат района исследования – резко континентальный с продолжительной суровой зимой и жарким сухим летом с небольшим количеством осадков преимущественно во второй половине летнего периода. По данным метеостанции г. Чита среднегодовая температура воздуха 2,7 °С, среднее годовое количество осадков – 376 мм, средняя продолжительность безморозного периода – 99 дней, сумма температур выше 10 °С – 1696 °С. По гидротермическому режиму бас-

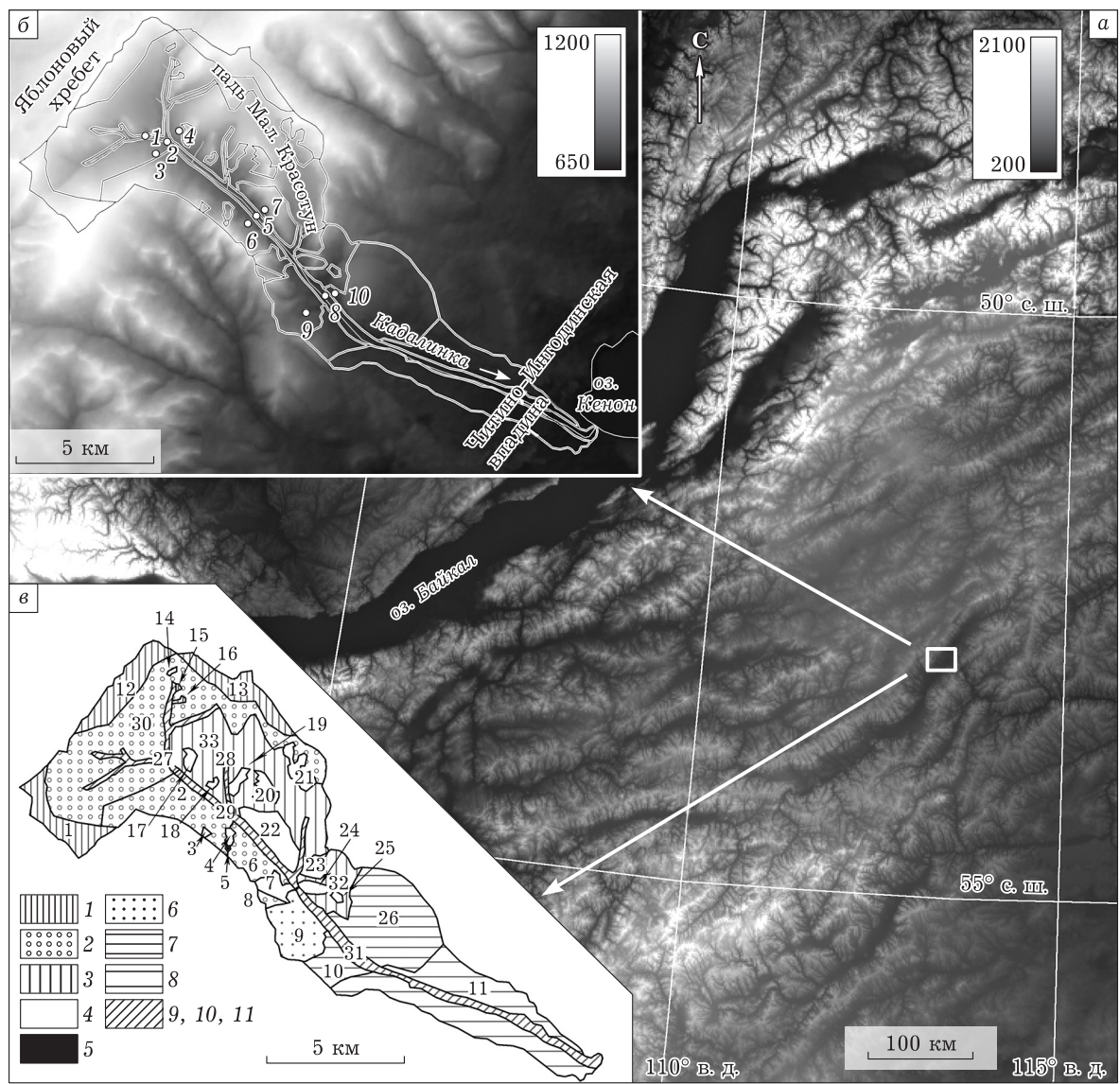


Рис. 1. Бассейн р. Кадалинка: а – карта абсолютных высот с указанием расположения бассейна, б – карта абсолютных высот бассейна с точками размещения термохрон и границами урочищ, в – ландшафтная карта-схема с номерами урочищ: 1–11 – группы урочищ (см. табл. 2)

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики бассейна р. Кадалинка

Абсолютная высота, м	Доля площади, %	Уклон, град.	Доля площади, %	Экспозиция склона	Доля площади, %
До 700	8,0	0–2	16,3	С	8,0
700–750	10,9	2–4	17,1	СВ	14,2
750–800	6,6	4–8	34,7	В	17,2
800–850	6,7	8–15	23,9	ЮВ	20,1
850–900	9,2	15–35	7,9	Ю	12,1
900–950	8,3	Более 35	0,1	ЮЗ	13,4
950–1000	11,7			З	9,2
1000–1050	13,7			СЗ	5,8
1050–1100	13,0				
Более 1100	11,9				

сейн в целом можно охарактеризовать как район теплых недостаточно-влажных местообитаний [Корреляционная эколого-фитоценотическая карта..., 1977].

Под влиянием комплекса вышеперечисленных условий сформировались природные системы бассейна, расположенные на стыке двух природных районов Южнояблонного таежного природного округа: Витимского плоскогорья и Читинско-Улетовского лесостепного и борového [Типы местности..., 1961]. По ботанико-географическому районированию [Лавренко и др., 1991] территория входит в Хангайско-Даурскую горнолесостепную провинцию Центрально-азиатской (Дауро-Монгольской) подобласти степной области Евразии. Это зона контакта светлохвойной тайги и экстразональных разнотравно-дерновинно-злаковых и горно-луговых степей.

Основу растительности Яблонного хребта и его склонов составляет таежная растительность Ангаридской фратрии Байкало-Джугджурской формации горно-таежных лиственничных (*Larix dahurica* Lawson) и лиственнично-сосновых (*Pinus sylvestris* L.) лесов с подлеском из рододендрона даурского (*Rhododendron dauricum* L.). Для Читино-Ингодинской впадины характерны Центральноазиатские формации травяных и злаковых сухих степей в сочетании с зарослями кустарников и остепненными лугами [Растительность, 1972].

В работе использовали следующие методы: маршрутных описаний, картографический, дистанционный, обработки цифровой модели рельефа (ЦМР), статистический анализ. Теоретической основой изучения ландшафтов явилось учение о геосистемах В. Б. Соцавы [2005], общегеографической основой – данные открытых источников OpenStreetMap и Google Earth. В качестве единиц картографирования выбраны урочища, различающиеся по положению в рельефе и по типу преобладающей растительности. Названия таксонов приведены согласно сводке “Конспект флоры Сибири: сосудистые растения” [2005]. Выделено 33 урочища, объединенные в 11 групп (табл. 2; см. рис. 1, б, в). Затем по ЦМР для каждого урочища вычислялись параметры, являющиеся переменными для статистического анализа.

ЦМР бассейна – растрового типа с регулярной сеткой (по данным радарной топографической съемки (Shuttle radar topographic mission – SRTM)). Размер ячейки (1”) после перевода в систему координат UTM составил около 35,7 м. Обработка ЦМР и вычисления параметров рельефа проводились в программе “White Box GAT” (<http://www.uoguelph.ca/~hydrogeo/Whitebox>). Границы бассейна и водосборные площади определялись по алгоритму D8 (Direction 8).

Для выявления, по каким параметрам рельефа различаются между собой выделенные ландшафты, а также их взаимосвязей применялся дискриминантный анализ. Получено шесть параметров: абсолютная высота, уклон определенной экспозиции, индекс влажности, плановая кривизна, профильная кривизна, стандартное отклонение уклона. Уклон определенной экспозиции, в отличие от обычного уклона, вычисляется инструментом Emboss Filter (“тиснение”) относительно ближайших соседних ячеек, учитывая только две противоположные экспозиции; в данном случае – север и юг, как наиболее влияющие на микроклимат. Положительные значения уклона маркируют южные склоны, отрицательные – северные, чем больше его модуль, тем больше уклон, близкие к нулю значения – у горизонтальных поверхностей. Индекс влажности равен натуральному логарифму отношения водосборной площади к уклону. Чем больше площадь водосбора и меньше уклон, тем больше индекс, тем потенциально более влажным будет участок поверхности при прочих равных условиях. Кривизна поверхности характеризует вогнутость или выпуклость участка, и влияет на условия увлажнения. Отрицательная кривизна у выпуклых участков, положительная – у вогнутых, близкая к нулю – у плоских. Плановая кривизна характеризует схождение или расхождение потоков воды (накопление или растекание), профильная – скорость стекания потоков воды по поверхности (замедление или ускорение) [Шарый, 2016]. Стандартное отклонение уклона показывает расчлененность и неоднородность рельефа, и влияет не только на эрозионные процессы, но и на растительность [Hofer et al., 2008].

## Ландшафты бассейна р. Кадалинка

Группа урочищ	Название группы урочищ	Номер урочищ	Площадь, км <sup>2</sup>	Высота, м	Средний уклон, град.
	Горно-таежные				
1	Плоских водораздельных поверхностей смешанных лиственных и лиственнично-березовые со смешанным подлеском на мерзлотно-таежных оподзоленных почвах	1, 12, 13	9	1056-1214	5,5
2	Склоновые и крутосклоновые лиственничные с участком березы с подлеском преимущественно из рододендрона даурского на мерзлотно-таежных дерновых почвах	2, 6, 8, 30	26,3	801-1171	8,1
3	Склоновые смешанные сосново-лиственничные и лиственничные с участком сосны со смешанным подлеском на мерзлотно-таежных оподзоленных почвах	15, 16, 32, 33	15,2	772-1122	8,9
4	Склоновые и крутосклоновые основные с подлеском преимущественно из рододендрона даурского на мерзлотно-таежных дерновых почвах	3, 4, 7, 14, 17-25	6,5	800-1138	15,2
5	Склоновые каменистые кустарниково-лишайниковые (курумники) на петроземах	5	0,02	1016-1101	23,5
	Подтаежные				
6	Склоновые и полого-склоновые березовые с травяным покровом на темно-серых лесных почвах	9	3,5	771-1003	7,2
	Горно-степные				
7	Склоновые ксерофитно-разнотравные на бескарбонатных малогумусных черноземах	10, 26	11,5	719-907	4,3
8	Днища впадины остепненные мелкодервинно-злаковые, разнотравные, разнотравно-леймусовые на мерзлотных черноземах	11	12,4	652-801	1,9
	Долинные и пойменные				
9	Долинные луговые и заболоченные с древесно-кустарниковыми зарослями вдоль рек и ручьев на аллювиальных луговых почвах	27	1,6	892-1048	6,3
10	Долинные древесно-кустарниковые преимущественно ивовые и ерниковые с участком лиственницы и березы на болотных и лугово-болотных почвах	28, 29	2	793-981	5,7
11	Долинный влажно-разнотравный луг с участками древесно-кустарниковых зарослей преимущественно из различных видов ив на луговых почвах	31	3,9	651-815	1,9

## Характеристика точек размещения термохронов

Номер точки (термохрона)	Высота, м	Экспозиция	Уклон, град.	Название биотопа
1 (1, 2)	908	ЮВ	2	Долинный лиственнично-редколесный со смешанным кустарниковым подлеском
2 (3, 4)	893	ЮВ	2	Долинный лиственничный с ерниковым подлеском
3 (5, 6)	953	СВ	8	Пологосклоновый березово-лиственничный с кустарниковым подлеском, заболоченный
4 (7, 8)	956	ЮЗ	15	Склоновый лиственнично-березовый с примесью осины с травяным покровом
5 (9)	827	–	0	Долинный влажный разнотравный луг
6 (11, 12)	887	СВ	20	Склоновый редкий лиственничный со смешанным подлеском (пирогенный)
7 (13, 14)	885	ЮЗ	45	Склоновый сосново-лиственничный с подлеском из рододендрона даурского
8 (15)	772	–	0	Долинный прирусловый, древесно-кустарниковые заросли с разнотравно-луговым покровом
9 (18)	832	СВ	5	Пологосклоновый березовый с травяным покровом
10 (19, 20)	832	ЮЗ	45	Склоновая разнотравно-злаковая степь

После случайной выборки ячеек больших урочищ (маленькие полностью) в программе STATISTICA 6.1 проводился дискриминантный анализ 34 % площади бассейна (22 662 ячейки) для двух случаев – по всем урочищам и по их группам.

Такой же анализ выполнен для температуры воздуха как фактора дифференциации ландшафтных единиц. Исходные данные получены с помощью термохронов – портативных приборов для измерения и записи окружающей температуры (ThermoChron DS1921G-F5), широко используемых в научных исследованиях [Помазкова, 2011; Василенко, Воропай, 2015]. В 10 точках вдоль трех профилей (в долине водотока, на левом и правом склонах) устанавливались по два прибора на высоте 2 м на расстоянии 10 м друг от друга (см. рис. 1, б; табл. 3). Поскольку одним из важнейших условий жизнедеятельности растений являются положительные температуры воздуха и температурные градиенты среды [Полевой, Саламатова, 1982], переменными для анализа выбраны максимальная, минимальная и среднесуточная температуры воздуха каждой декады со второй декады июля по первую декаду сентября 2009 г. В итоге получено 17 групп наблюдений

(термохроны) и 18 переменных (температуры по декадам).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе ранее созданных картографических материалов [Ландшафты..., 1977], разновременных космоснимков и маршрутных обследований составлена ландшафтная карта-схема (см. рис. 1, в). В ландшафтной структуре бассейна имеет место сочетание горно-таежных, лесостепных и горно-степных геосистем. В верховьях бассейна реки и верхних частей склонов хребта преобладают горно-таежные геосистемы – склоновые лиственничные со смешанным подлеском на мерзлотно-таежных оподзоленных и мерзлотно-таежных дерновых почвах, приуроченных к плоским поверхностям водораздела Яблонового хребта. В подросте преимущественно лиственница даурская, береза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukaczew) и осина (*Populus tremula* L.), в подлеске преобладают *Betula fruticosa* Pallas, *Duschekia fruticosa* (Rupr.), *Ledum palustre* L., *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz и *Vaccinium uliginosum* L., реже *Spirace salicifolia* L. На хорошо дренированных участках доминируют *Rhododendron*

*dauricum* L. и *Rosa acicularis* Lindley, в травяно-кустарничковом – *Vaccinium vitis-idaea* L. s. str. Травяной покров образован преимущественно лесным комплексом видов *Lathyrus humilis* (Ser.) Sprengel, *Rubus saxatilis* L., *Euphrasia pectinata* Ten., *Equisetum pratense* Ehrh., *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Moehringia lateriflora* (L.) Fenzl и т. п.

В средней части бассейна и на очень крутых склонах они сменяются на горно-таежные склоновые сосново-лиственничные и сосновые с подлеском преимущественно из рододендрона даурского на мерзлотных таежных оподзоленных и мерзлотно-таежных дерновых почвах. Подрост образован сосной и лиственницей даурской. Кустарниковый ярус хорошо выражен, кроме рододендрона даурского встречаются *Rosa acicularis* Lindley, *Spiraea media* Franz Schmidt, *Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn и *Salix bebbiana* Sarg. Травяной ярус дает небольшое покрытие и представлен как лесными (*Lathyrus humilis*, *Sanguisorba officinalis* L.), так лесостепными (*Pulsatilla patens* (L.) Miller, *Polygonatum odoratum* (Miller) Druce, *Lilium pumilum* Delile, *Iris uniflora* Pallas ex Link, *Astragalus membranaceus* Bunge A. и др.), и степными (*Koeleria cristata* (L.) Pers., *Carex pediformis* C. A. Meyer, *Stellera chamaejasme* L., *Bupleurum scorzonerifolium* Willd., *Patrinia rupestris* (Pallas) DuRoi и др.) видами. Эти ландшафты образуют вместе таежный высотно-пооясный комплекс, занимающий высоты преимущественно от 850 до 1200 м.

В подножиях макросклона хребта расположены полого-склоновые ландшафты березовые разнотравно-травяные на горных темно-серых лесных неоподзоленных почвах. В подросте преобладает береза плосколистная и осина. Кустарниковый подлесок очень редкий. Травяной покров представлен *Festuca litvinovii* (Tzvelev) E. Alexeev, *Carex duriuscula* C. A. Mey., *Carex pediformis* C. A. Mey., *Elymus confusus* (Roshev.) Tzvelev, *Iris uniflora* Pallas, *Atragene sibirica* L., *Fragaria orientalis* Losinsk., *Vicia unijuga* A. Br., *Dendranthema zawadskii* (Herb.) Tzvelev и др. Данные геосистемы в сочетании со злаково-разнотравными лугами образуют подтаежный высотно-пооясный комплекс.

Горно-степные ландшафты с ксерофитно-разнотравной растительностью на бескарбо-

натных малогумусных черноземах встречаются участками на крутых склонах световых экспозиций. Наряду со злаками (*Koeleria cristata* (L.) Pers., *Stipa krylovii* Roshev., *Festuca litvinovii*), здесь широко представлено ксерофитное разнотравье (*Filifolium sibiricum* (L.) Kitam., *Pulsatilla turczaninovi* Krylov et Serg., *Sedum aizoon* L., *Lespedeza hedysaroides* (Pallas) Kitag., *Artemisia macilenta* (Maxim.) Krasch., *Bupleurum scorzonerifolium* и др.). В днище Читино-Ингодинской впадины развиты мелкодерновинно-злаковые, разнотравные и разнотравно-леймусовые степи на мерзлотных черноземах.

Долинные комплексы вдоль русла р. Кадалинка в верхнем течении представлены преимущественно древесно-кустарниковыми сообществами из лиственницы даурской и березы плосколистной с различными видами кустарников (*Salix bebbiana* Sarg., *Betula fruticosa*, *Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br., *Spiraea salicifolia* L., *Ribes procumbens* Pall.), выровненные участки занимают пойменные торфянистые и разнотравные луга. В среднем течении наблюдается сужение долины (урочище “Дворцы”) и отсутствие выраженной поймы, здесь в состав долинных фаций входит только прирусловая древесно-кустарниковая растительность. В нижнем течении, после впадения руч. Мал. Красотун, долина реки расширяется, выполаживается и долинные сообщества представлены разнотравно-луговыми сообществами, заболоченными, либо остепненными в зависимости от форм микрорельефа и уровня залегания мерзлоты. В травостое лугов участвуют осоки *Carex korschinskyi* Kom., *Carex rhynchophylla* C. A. Meyer, злаки *Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin., *Poa sibirica* Roshev. и разнотравье *Sanguisorba parviflora* (Maxim.) Takeda, *Lilium pensylvanicum* Ker-Gawler, *Vicia amoena* Fischer, *Epilobium palustre* L., *Polemonium racemosum* (Regel) Kitam., *Serratula centauroides* L., *Sedum purpureum* (L.) Schultes. и др. Местами вдоль русла встречаются заросли ив (*Salix kochiana*, *S. rorida* Laksch., *S. miyabeana*).

Результаты дискриминантного анализа по параметрам рельефа показали хорошую дискриминацию урочищ в целом (лямбда Уилкса = 0,023;  $F(192,13) = 621,79$ ;  $p < 0,00$ ). Частная лямбда Уилкса, оценивающая одиночный вклад переменных в дискриминацию, равна

Стандартизированные коэффициенты канонических переменных (урочища)

Параметр	Корень			
	1	2	3	4
Абсолютная высота	-1,104	-0,008	-0,02	-0,11
Уклон определенной экспозиции	0,001	-1,004	0,093	-0,026
Индекс влажности	0,023	-0,047	0,012	-0,665
Плановая кривизна	-0,106	0,061	0,309	-0,249
Профильная кривизна	-0,395	0,147	0,408	-0,5
Стандартное отклонение уклона	0,07	0,185	0,917	0,268
Собственные значения	8,582	1,008	0,672	0,29
Кумулятивная доля	0,81	0,905	0,968	0,995

П р и м е ч а н и е. Показаны только первые четыре корня.

(по убыванию вклада): абсолютной высоте 0,11, уклону определенной экспозиции - 0,5, стандартному отклонению уклона - 0,64, профильной кривизне - 0,76, индексу влажности - 0,89, плановой кривизне - 0,93. Корень 1 наиболее связан с абсолютной высотой (объединенная внутригрупповая корреляция равна -0,92), и вклад у высоты наибольший (см. табл. 4). По корню 1 прослеживается замещение водораздельных урочищ склоновыми, далее днищем впадины, смена типов растительности (древесной на травянистую), трансформация долинных урочищ происходит от верховьев к устью (см. рис. 2, а). Профильная кривизна вносит второй вклад в корень 1 (см. табл. 4), однако объединенная внутригрупповая корреляция очень мала (0,03), поэтому и зависимость - нелинейная. Распределение этого, равно как и остальных значимых параметров, по высоте (рис. 3, а, г, д), показывает не линейную, а высотно-поясную структуру; менее значимые параметры не зависят от высоты (см. рис. 3, б, в).

Корень 2 имеет наибольшую корреляцию с уклоном определенной экспозиции (объединенная внутригрупповая корреляция равна -0,97) и преобладающий вклад этой переменной (см. табл. 4). Корень 3 связан в большей степени со стандартным отклонением уклона и в меньшей - с обоими видами кривизны (см. табл. 4), и только в корень 4 наибольший вклад вносит индекс влажности. Эти корни отделяют долинные урочища от остальных (см. рис. 2, б).

Анализ для 11 групп урочищ показал не много меньшую дискриминацию, чем для

урочищ: лямбда Уилкса = 0,07;  $F(60,12) = 1310$ ;  $p < 0,00$ . По сравнению с урочищами, одиночный вклад уклона определенной экспозиции переместился на четвертое место после профильной кривизны. Корню 1 присущи те же, что и для урочищ, закономерности, остальные корни отличаются (табл. 5). Корень 2 отделяет вогнутые и сильно расчлененные поверхности (долинные группы

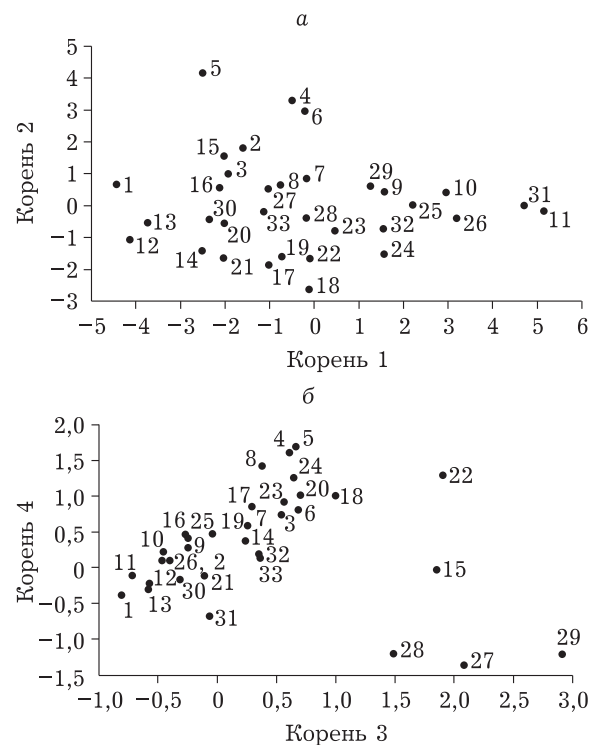


Рис. 2. Средние значения канонических переменных по 33 урочищам: а - корни 1 и 2, б - корни 3 и 4



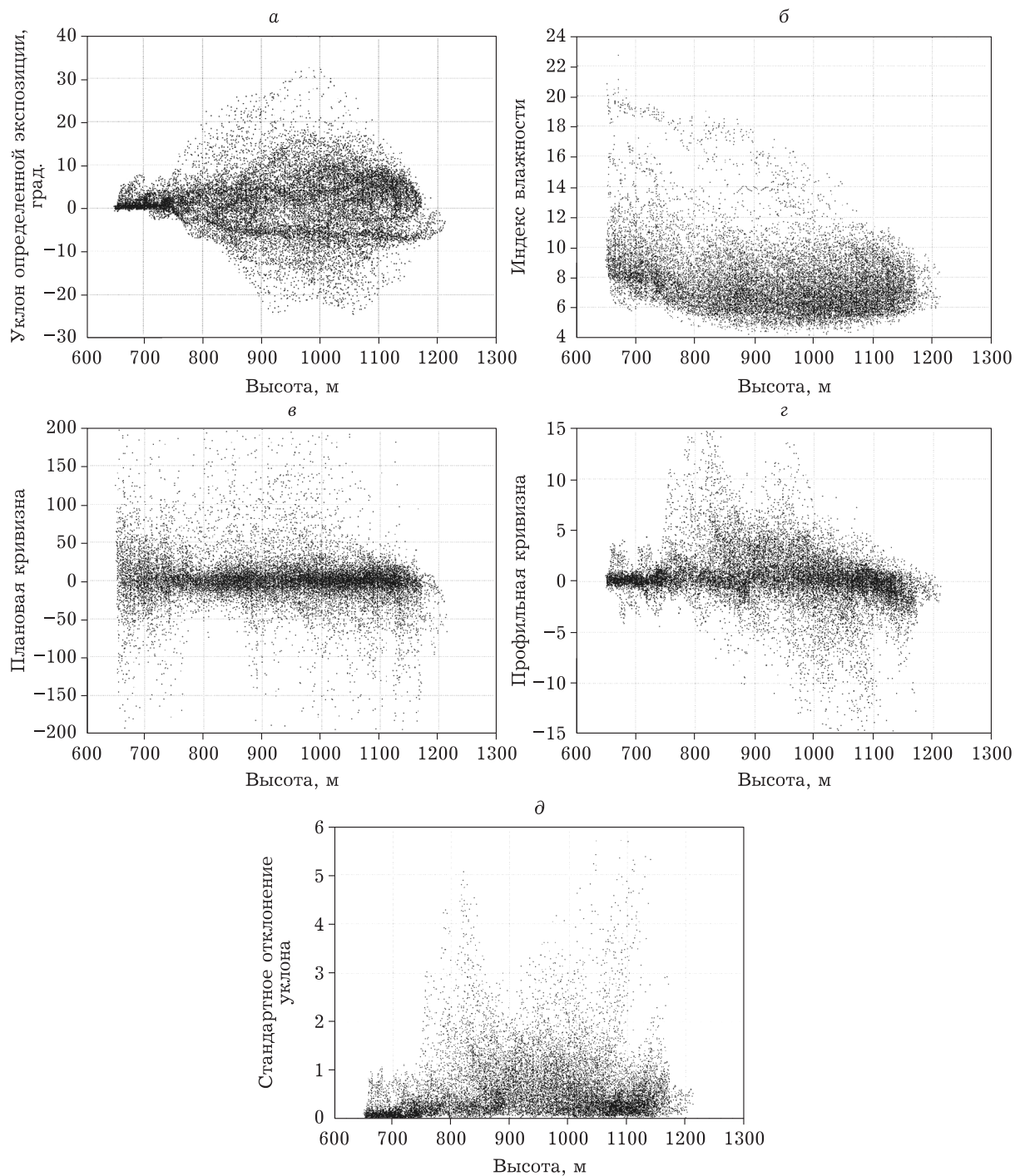


Рис. 3. Распределение параметров рельефа по высоте в бассейне р. Кадалинка: а – уклон определенной экспозиции, б – индекс влажности, в – плановая кривизна, г – профильная кривизна, д – стандартное отклонение уклона

№ 9 и 10) от выпуклых и слабо расчлененных (водораздельных № 1 и степных групп № 7, 8) (рис. 4, а). Для корней 3 и 4 характерно сочетание вклада уклона определенной экспозиции и индекса влажности: корень 3 обозначает южные сухие (группа № 4)

и северные влажные ландшафтные единицы (группы № 9–11), корень 4 – наоборот, сухие северные (группа № 5) и южные влажные (см. рис. 4, б).

Достоверность результатов оценивалась по требованиям к исходным данным для диск-

Стандартизированные коэффициенты канонических переменных (группы урочищ)

Параметр	Корень			
	1	2	3	4
Абсолютная высота	-1,07	0,006	-0,105	-0,121
Уклон определенной экспозиции	0,111	-0,132	0,63	-0,734
Индекс влажности	0,08	-0,154	-0,529	-0,594
Плановая кривизна	-0,099	-0,375	-0,172	0,052
Профильная кривизна	-0,351	-0,518	-0,351	-0,002
Стандартное отклонение уклона	-0,051	-0,824	0,26	0,271
Собственные значения	5,61	0,524	0,275	0,101
Кумулятивная доля	0,86	0,94	0,982	0,998

П р и м е ч а н и е. Показаны только первые четыре корня.

риминантного анализа [Боровиков, 1998]. При достаточном размере всей выборки и большинства урочищ урочища № 5 и 15 слишком малы. Однако, хотя склоновый курумник (урочище № 5) в этом бассейне статистически мало значим, согласно литературным данным и собственным наблюдениям, полученные результаты соответствуют действительности (высокие крутые северные склоны) [Железняк и др., 1992]. Рекомендованное нормальное распределение каждой переменной отсутствует только у малых урочищ № 5, 15 и 18 по некоторым переменным. Исключение экстремумов (в данном случае, только у плановой кривизны) не привело к существенным изменениям результатов. Альтернативные вычисления отдельно для больших и для малых урочищ, также практически не повлияли на результат. Следовательно, итоги можно считать достоверными.

Результаты анализа температуры воздуха следующие: лямбда Уилкса = 0,0004;  $F(288) = 5,33$ ;  $p < 0,00$ . Влияние температур первой декады сентября и среднесуточной температуры второй декады августа незначимо ( $p > 0,05$ ) из-за большой внутригрупповой дисперсии. В отличие от итогов анализа параметров рельефа, здесь нет явного преобладания вклада какой-либо одной переменной, у каждого корня своя комбинация вкладов (табл. 6). Корень 1 отделяет долинные точки (№ 1, 2, 5, 8), где, по сравнению со склонами, минимальная и среднесуточная температура ниже (рис. 5). Максимальная температура в долине в июле и начале августа выше, чем на склонах, а в середине и

конце августа – ниже. На точке № 9, наиболее удаленной по оси корня 1 от долины, соответственно, наоборот. Остальные точки занимают промежуточное положение. По корню 2 выделяется точка № 6, где минимальная температура ниже, максимальная и среднесуточная – выше. Она находится в склоновом листовенничнике со смешанным подлеском, на пройденном лесными пожарами уча-

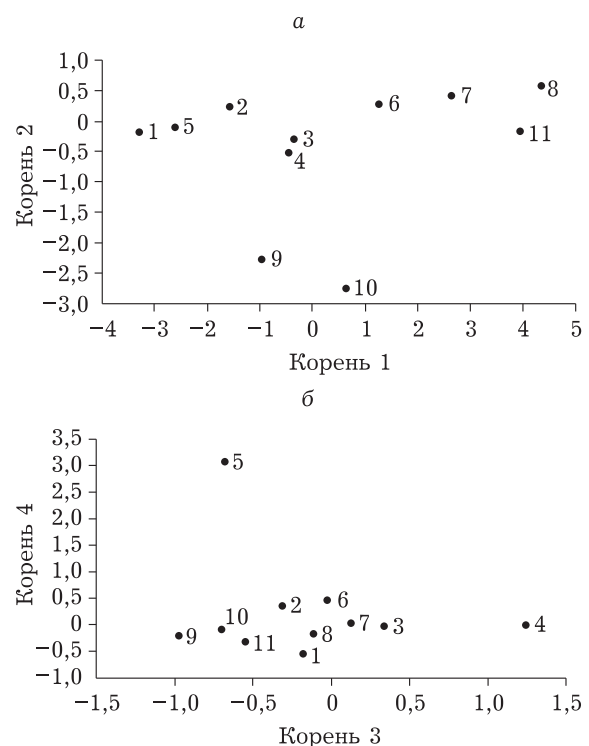


Рис. 4. Средние значения канонических переменных по 11 группам урочищ: а – корни 1 и 2, б – корни 3 и 4

## Стандартное отклонение канонических переменных

Корень	Урочища			
	Диапазоны стандартного отклонения канонических переменных			
	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2
1	3, 5, 12-15, 17, 18, 24, 25	1, 4, 8-11, 16, 19-21, 23, 26-29, 32	6, 7, 22, 30, 31, 33	2
2	5, 10, 11, 12, 14-16, 21, 25, 28, 31	1, 9, 2, 13, 17-19, 26, 27, 29, 32	3, 4, 6, 20, 23, 24, 30, 33	7, 8, 22
3	1, 12, 16	2, 3, 4, 5, 7-11, 13, 14, 17-21, 23, 25, 26, 28, 30	6, 24, 31, 32, 33	15, 22, 27, 29
4		1, 2, 3, 5, 9-14, 16, 17, 19, 21, 23-26, 30, 32	4, 6, 7, 8, 15, 20, 27, 28, 31, 33	22, 29
		Группы урочищ		
1	5, 8	1, 6, 7, 9, 10, 11	2, 3, 4	
2	1, 5	2, 6, 7, 8	3, 4, 11	9, 10
3		1, 3, 5, 6, 7, 8, 11	2, 4, 9, 10	
4	5	1, 3, 6, 7, 8	2, 4, 9, 10, 11	

П р и м е ч а н и е. Показаны только первые четыре корня.

стке, и ей присущи особенности пирогенных ландшафтов, в том числе резкие перепады температур из-за утраты роли растительности регулировать микроклимат [Евдокименко, 2014]. В точках № 4, 7, 10 (на левом, юго-западном склоне долины) от верховьев к устью реки температура в среднем повышается. На правом склоне из-за точки № 6 эта закономерность нарушается, однако точка № 9 в среднем теплее точки № 3. Наибольший вклад в дискриминацию по минимальной температуре вносит третья декада августа, по среднесуточной температуре – вторая декада июля, по максимальной температуре – третья декада июля (см. табл. 6).

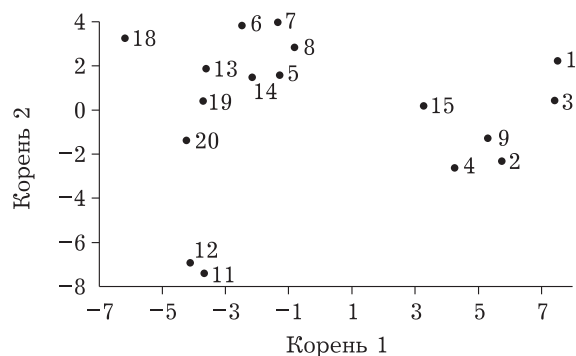


Рис. 5. Средние значения канонических переменных по 17 термохронам

## ОБСУЖДЕНИЕ

Рельеф является важнейшим фактором, влияющим на взаимодействие компонентов ландшафтов, определяя направление и интенсивность этих взаимодействий, в первую очередь, потому что служит перераспределителем света, тепла и влаги, и в этом смысле, управляет условиями существования растительности, почвенно-грунтовыми условиями и т. д. В горных областях связь изменения типов растительности с высотой обычно объясняется изменением температуры и влажности. Общая тенденция такова: температура с увеличением высоты падает, осадки – возрастают. Учитывая геоморфологические особенности изучаемого бассейна, его расположение на макросклоне средневысотного хребта и в днище обширной впадины, абсолютная высота также оказалась наиболее важным фактором дифференциации ландшафтных единиц.

Как лиственница, так и сосна, основные представители дендрофлоры изучаемой территории, имеют широкий диапазон условий произрастания и высокие адаптационные свойства к существованию в экстремальных условиях [Попова и др., 2002], поэтому ланд-

шафты (и лиственничные, и сосновые, и смешанные сосново-лиственничные) более всего оказались различимы по высоте, чем по остальным параметрам (уклон, экспозиция и др.). Смену лиственничных и сосновых урочищ можно связать с различной толерантностью этих видов к гипотермии и засушливости [Попова и др., 2002]. Степные ландшафты занимают те местообитания и элементы рельефа, где гидротермические условия не позволяют произрастать какой-либо древесной растительности.

Уклон определенной экспозиции не вносит существенного вклада в распределение групп урочищ и более значим при дробном делении ландшафтных выделов. Например, при том, что склоновые смешанные сосново-лиственничные и лиственничные с участием сосны со смешанным подлеском ландшафты объединены в одну группу (№ 3), внутри она характеризуется высокой пестротой и мозаичностью нижних ярусов лесных формаций из-за различий почвенно-грунтовых условий разных элементов рельефа: от высоких прирусловых с незначительным уклоном на север (урочища № 15, 16) с повышенным увлажнением, что прослеживается в видовом составе подлеска, до подгорных с небольшим уклоном на юг (урочище № 32), имеющего в составе травянистой растительности лесостепные и степные виды растений. Заметим, что урочища № 17–20 (группа № 4) – это фрагменты соснового леса после массовых рубок, и, очевидно, прилегающая к ним часть урочища № 33 представляет результат замены сосновых ландшафтов на смешанные сосново-лиственничные, вследствие проникновения лиственницы с вышележащих участков.

Аналогичная мозаичность наблюдается и для сосновых урочищ (группа № 4), большинство из которых находятся на средних высотах южной экспозиции, со средним и большим уклоном, кроме урочищ № 3, 4, 7 на северных склонах (составляющие сосновые сообщества соседнего бассейна) и урочища № 25 – самого низкого и уплощенного в этой группе, с разреженным древостоем и имеющего признаки сосновых лесостепных геосистем Забайкалья.

Склоновый березовый лес (урочище № 9), находящийся в пограничных условиях свое-

го существования, хорошо демонстрирует динамическую связь растительности с рельефом: в период с 2006 по 2014 г. произошло отступление его границы и увеличение площади склонового степного урочища (№ 10) на высотах до 850 м на уплощенных и слегка выпуклых поверхностях. При классификации урочищ по параметрам рельефа, ячейки этого участка имеют одинаковую вероятность отнесения и к данному лесу, и к степным ландшафтам. Скорее всего, при увеличении влажности березовые сообщества займут прежнее положение, а при увеличении засушливости могут полностью смениться на степь.

Профильная кривизна вносит больший вклад, чем плановая в дискриминацию урочищ и групп урочищ, что вызвано более сильной корреляцией ее с влажностью почвы [Флоринский, 2010].

Стандартное отклонение уклона совместно с профильной кривизной (см. рис. 2, б) более значимы, чем индекс влажности при разделении долинных урочищ (кроме группы № 11), с одной стороны (сильно расчлененные и вогнутые поверхности), и водораздельных и степных – с другой (слабо расчлененные и выпуклые) (см. рис. 2, б; 4, а). То есть эти показатели выступают индикатором различия температурно-влажностных свойств почвы, густоты временной эрозионно-дренажной сети, разнообразия экологических условий для растительности, напрямую не связанных с наличием водотока и его порядком. Поэтому отдельно от остальных долинных стоит группа № 11 (нижнее течение реки), а ближе к ним находятся склоновые сосновые урочища (группа № 4) (см. рис. 2, б; 4, а).

Малая значимость индекса влажности, по мнению авторов, связана с тем, что он относится к речной и эрозионно-дренажной сети, и непосредственно связан с порядком элемента, а для территории в целом также и с ее густотой. Связь данного индекса с другими показателями, например, с содержанием влаги в почве и уровнем грунтовых вод, неоднозначна [Sørensen et al., 2006]. Кроме того, значительную часть долинных ландшафтов занимает прибрежная территория, где данный индекс не имеет смысла (кроме мест слияния водотоков), из-за малой водосборной площади. Тем не менее водоток, несомнен-

## Стандартизированные коэффициенты канонических переменных (термохроны)

Температурные параметры		Корень			
		1	2	3	4
2-я декада июля	Максимум	0,2874	-0,2855	0,9815	-0,137
	Минимум	-0,9273	0,8693	1,0191	-0,8074
	Средняя	-1,6047	-1,4956	-1,5762	1,031
3-я декада июля	Максимум	0,9522	-1,2376	2,4775	-1,9806
	Минимум	-0,3761	-0,0837	0,8505	-1,1165
	Средняя	-1,1234	-0,7642	-3,7798	3,5637
1-я декада августа	Максимум	0,9643	-0,6557	0,674	1,5541
	Минимум	-0,624	0,3428	0,657	1,5847
	Средняя	-0,8414	-0,7614	-1,188	-2,3789
2-я декада августа	Максимум	-0,3438	0,1227	1,0948	0,7321
	Минимум	-0,7429	0,3872	1,4442	0,3486
3-я декада августа	Максимум	-0,6317	-0,4559	0,6339	-0,4626
	Минимум	-1,792	0,947	2,4476	0,9491
	Средняя	0,145	-1,1718	-2,0546	-1,6613
Собственные значения		21,6361	11,8384	3,3653	0,3337
Кумулятивная доля		0,576	0,8911	0,9807	0,9896

П р и м е ч а н и е. Показаны только первые четыре корня.

но, влияет на ландшафт, поэтому группы долинных урочищ отчетливо отделяются, причем верховья в среднем более влажные (см. рис. 2, б; 4, б). С противоположной стороны находится группа склоновых сосновых урочищ (№ 4) с малыми водосборными площадями, большими уклонами, где нет крупных водотоков (см. рис. 2, б; 4, б).

Пространственная структура ландшафтных единиц (внутригрупповая изменчивость) визуально оценивается по разбросу точек на графике канонических переменных для всех ячеек, а также по стандартному отклонению этих величин (табл. 7), чем оно больше, тем шире диапазон параметров, связанных с корнями. Наибольшая однородность (минимальное стандартное отклонение) группы водораздельных урочищ (№ 1), курумника (№ 5) и днища впадины (№ 8) обусловлена малым перепадом и высот, и уклонов, и экспозиции, и кривизны. Сосновым урочищам (группа № 4), наоборот, свойственен широкий диапазон всех параметров как для обширных урочищ (№ 22), так и для небольших, например, урочища № 7, расположенного вдоль линии перегиба водораздела и ложбины с крутыми склонами противоположных экспозиций (см. табл. 7). Большой разброс у долинных урочищ вызван наличием русла реки и прибрежных террито-

рий с сильно различающимися индексами влажности, уклоном и кривизной. Большая неоднородность параметров листовенных урочищ (группа № 2) еще раз подтверждает высокую адаптацию лиственницы даурской к различным условиям.

Отметим особенность водораздельных урочищ – вместе группироваться по всем корням (см. рис. 2, а, б), что означает их сходство по всем параметрам.

Если для ландшафтов стандартное отклонение канонических корней характеризует пространственную изменчивость, то для температурных параметров оно является показателем временной изменчивости. Точка № 5 имеет максимальное стандартное отклонение (1,2–1,45), т. е. наибольшие различия в течение декады, что вызвано, вероятно, расположением на открытой пойме без растительности в сужении долины с крутыми склонами. Чуть меньше разброс в точке № 6 (пирогенный участок), но больше всех остальных (0,9–1,4). При сравнении данных двух термохрон в одной точке (см. рис. 5), можно заметить, что в долине (точки № 1 и 2) разница между ними самая большая. Это указывает на значительные локальные микроклиматические различия, связанные, скорее всего, с близостью водотока.

В целом прослеживаются аналогичные описанным выше закономерности микроклимата (в данном случае только по температуре воздуха), а именно: зависимость от высоты, экспозиции, уклона, расположения на склоне или в долине водотока. Хотя для полноценных выводов по микроклимату недостаточно данных, полученные результаты согласуются с проведенными ранее исследованиями, например, более низкая температура в днищах узких долин по сравнению со склонами и водоразделами [Шполянская, 2010].

В заключение скажем о проблеме соответствия ландшафтных и геоморфологических единиц, обусловленной полимасштабным характером межкомпонентных связей в ландшафтах [Хорошев и др., 2010]. Так, в работе [Fanguan Yu et al., 2015] увеличение размера ячейки ЦМР привело к увеличению корреляции ряда топографических индексов с видовым обилием рода *Rhododéndron*. Однако в исследуемом случае, при повышении масштабного уровня плановой кривизны (путем сглаживания исходной ЦМР фильтром Гаусса с размером ядра свертки, равном четырем стандартным отклонениям), вклад этого параметра остался по-прежнему низким. Предполагаем, что при заданном размере ячейки ЦМР плановая кривизна более подходит для изучения изменчивости видового состава подлеска и травяного покрова, характеристик почв дробных выделов (на уровне фаций), диагностирующих условия смены микрорельефа. Поиск закономерностей и алгоритмов нахождения соответствий масштабов параметров рельефа и ландшафтов – интересная научная задача для дальнейших исследований.

## ВЫВОДЫ

Дискриминантный анализ параметров рельефа бассейна малой реки показал, что наибольший вклад в дискриминацию как урочищ, так и групп урочищ вносит абсолютная высота. Соответственно, водораздельные урочища сменяются склоновыми, а затем днищем впадины, долинные урочища – от верхнего течения к нижнему, растительность – от древесной к травянистой. Уклон определенной экспозиции (в данном случае, север – юг) –

второй по значимости вклада параметр для урочищ, и четвертый – для групп урочищ. Склоновые листовенничные, сосновые и смешанные группы урочищ из-за высоких адаптационных свойств лесообразующих древесных пород имеют широкий диапазон этого параметра, урочища данных групп различаются видовым составом нижних ярусов. Стандартное отклонение уклона совместно с профилем кривизны как показатели температурно-влажностных свойств почвы отличают группы долинных урочищ верхнего и среднего течения реки от водораздельных и степных. Несмотря на малый вклад, индекс влажности как индикатор наличия водотоков важен при отделении долинных геосистем от остальных. Плановая кривизна – наименее релевантный параметр для выбранного масштаба ландшафтных единиц. Практически по всем параметрам водораздельные выделы являются наиболее однородными и имеют наибольшую степень сходства.

Результаты дискриминантного анализа параметров температуры воздуха показали, что долины в среднем более холодные, чем склоны, а пирогенный участок имеет наибольшие амплитуды колебания температур.

Работа выполнена в рамках Проекта XI.174.1.8 по Программе ФНИ СО РАН на 2017–2020 гг.

## ЛИТЕРАТУРА

- Атлас Забайкалья (Бурятская АССР и Читинская область). Москва; Иркутск: Изд-во ГУГК, 1967. 176 с.
- Боровиков В. П. Популярное введение в программу STATISTICA. М.: КомпьютерПресс, 1998. 267 с.
- Василенко О. В., Воропай Н. Н. Особенности формирования климата котловин Юго-Западного Прибайкалья // Изв. РАН. Сер. географическая. 2015. № 2. С. 104–111.
- Дулупова Б. И. Степи горной лесостепи Даурии и их динамика. Чита: ЧГПИ им. Н. Г. Чернышевского, 1993. 396 с.
- Евдокименко М. Д. Пирогенные нарушения лесорастительной среды в сосняках Забайкалья и их лесоводственные последствия // Лесоведение. 2014. № 1. С. 3–12.
- Ерофеев А. А. Ландшафтно-экологический анализ бассейнов малых рек на основе геоинформационного моделирования: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2012. 15 с.
- Железняк И. И., Мальчикова И. Ю., Шполянская Н. А., Янушаускас А. И. Курумы Северного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1992. 182 с.
- Конспект флоры Сибири: сосудистые растения. Новосибирск: Наука, 2005. 362 с.

- Корреляционная эколого-фитоценотическая карта. М-6 1 : 7 500 000 / И. И. Букс, В. Н. Байборodin, Л. С. Тимирбаева; под общ. ред. В. Б. Сочавы. Иркутск: Изд-во Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР, 1977.
- Корсун О. В., Гилева М. В. Реликты // Малая энциклопедия Забайкалья. Природное наследие. Новосибирск: Наука, 2009. С. 462–463.
- Корытный Л. М. Бассейновая концепция природопользования. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2001. 163 с.
- Кузьмин С. Б., Шаманова С. И., Казановский С. Г. Определение высотной поясности ландшафтов западного Прибайкалья на основе анализа рельефа и дендрофлоры // Геогр. и прир. рес. 2012. № 4. С. 137–149.
- Лавренко Е. М., Карамышева З. В., Никулина Р. И. Степи Евразии. Л.: Наука, 1991. 146 с.
- Ландшафты юга Восточной Сибири. Настенная карта м-ба 1 : 1 500 000 / под общ. ред. В. Б. Сочавы. М.: ГУГК, 1977.
- Мезозойская тектоника Забайкалья / отв. ред. И. В. Лучицкий. Новосибирск: Наука, 1975. 206 с.
- Михеев В. С. Ландшафтно-структурный анализ // Человек у Байкала: экологический анализ среды обитания. Новосибирск: Наука, 1993. С. 8–25.
- Плюснин В. М. Ландшафтный анализ горных территорий. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. 257 с.
- Полевой В. В., Саламатова Т. С. Физиология роста и развития растений. Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1982. 249 с.
- Помазкова Н. В. Микроклиматические исследования горных ландшафтов Центрального Забайкалья // Девятое сибирское совещание по климатологическому мониторингу: мат-лы рос. конф. / под ред. М. В. Кабанова. Томск: Изд-во Аграф-Пресс, 2011. С. 37–40.
- Попова О. А., Уманская Н. В., Якимова Е. П. Экология растений Забайкалья: учеб.-метод. комплекс. Чита, 2002. Ч. 1. 159 с.
- Растительность // Карты природы, население и хозяйства юга Восточной Сибири / под ред. В. Б. Сочавы. М.: ГУГК, 1972.
- Сочава В. Б. Теоретическая и прикладная география. Новосибирск: Наука, 2005. 288 с.
- Типы местности и природное районирование Читинской области. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 158 с.
- Флоринский И. В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: дис. ... д-ра техн. наук. Пушино, 2010. 267 с.
- Хорошев А. В., Мерекалова К. А., Алещенко Г. М. Полимасштабная организация межкомпонентных отношений в ландшафте // Изв. РАН. Сер. географическая. 2010. № 1. С. 26–36.
- Хромов С. П., Петросянец М. А. Метеорология и климатология: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2001. 528 с.
- Шарый П. А. Геоморфометрический анализ пространственной изменчивости почв и экосистем: дис. ... д-ра биол. наук. Ростов-на-Дону, 2016. 319 с.
- Шполянская Н. А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. Москва; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2010. 200 с.
- Fangyuan Yu, Tiejun Wang, Groen T. A., Skidmore A. K., Xuefei Yang, Yuying Geng, Keping M. Multi-scale comparison of topographic complexity indices in relation to plant species richness // Ecol. Complexity. 2015. Vol. 22. P. 93–101.
- Hofer G., Wagner H. H., Herzog F., Edwards P. J. Effects of topographic variability on the scaling of plant species richness in gradient dominated landscapes // Ecography. 2008. Vol. 31. P. 131–139.
- Romstad B., Eitzelmüller B. Structuring the digital elevation model into landform elements through watershed segmentation of curvature // Proc. Geomorphometry. 2009. P. 55.
- Sørensen R., Zinko U., Seibert J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations // Hydrol. and Earth System Sci. 2006. N 10. P. 101–112.

## Analysis of the Geomorphic Features and Spatial Location of Landscapes with the Use of Geoinformatics and Statistic Approaches

N. V. POMAZKOVA, V. Y. ABAKUMOVA

*Institute of natural resources, ecology and cryology, SB RAS  
672014, Chita, Nedorezova str., 16a  
Email: naste2@yandex.ru, faith-sh@mail.ru*

The article is devoted to study of geomorphic features impact on landscapes. The object of study was a small river basin in Zabaikalsky Krai (Russia) where 33 landscape units were contoured. Six terrain attributes (elevation, directional slope, wetness index, plan curvature, profile curvature, standard deviation of slope) were calculated from digital elevation model and were used as variables for discriminant analysis. Root 1 was responsible for 81 % of variance and had the biggest correlation with elevation. Root 2 (9 % of variance) correlated with directional slope, root 3 (6 % of variance) – with standard deviation of slope and profile curvature, root 4 (3 % of variance) – with wetness index and profile curvature. Also, some characteristics of summer air temperature (day mean and extremes) were used as variables for discriminant analysis. Valley landscapes were coldest at the average; the burnt wood area had the biggest extremes.

**Key words:** landscapes, geomorphic features, digital elevation model, discriminant analysis.