

УДК 911.2 911.9

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ АРИДНЫХ ВЫСОКОГОРИЙ НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО МАССИВА МОНГУН-ТАЙГА

Е.С. Зелепукина¹, С.А. Гаврилкина², А.В. Терехов³, А.И. Резников⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций, кафедра экологической безопасности телекоммуникаций, доц., канд. геогр. наук; e-mail: elezelepu@gmail.com

² Международный институт мониторинга развития демократии и парламентаризма, Межпарламентская ассамблея государств – участников СНГ, Санкт-Петербург, советник, канд. геогр. наук; e-mail: svetilnic@mail.ru

³ Государственный гидрологический институт (ФГБУ «ГГИ»), Санкт-Петербург, Россия, группа геоинформационных технологий, руководитель группы; e-mail: antonvtterekhov@gmail.com

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра физической географии и ландшафтного планирования, ст. преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: ar1725.2@gmail.com

Проведен анализ пространственной структуры ландшафтов аридных высокогорий по комбинациям нескольких морфометрических характеристик на основе данных дистанционного зондирования высокого разрешения. Выбор в качестве модельного участка территории горного массива Монгун-Тайга, расположенного на западе Республики Тыва (Россия), обусловлен возможностью верификации результатов морфометрического анализа вследствие наличия обширного материала многолетних полевых исследований территории массива. Показано, что разбиение территории на участки, относительно однородные по морфометрическим параметрам рельефа, с достаточно высокой точностью описывает местоположения. Установлено, что средняя по высотным интервалам энтропия распределения групп растительных сообществ существенно снижается при выделении местоположений на основе комбинаций морфометрических величин для всего высотного профиля вне зависимости от макросклона.

Совмещение полевых, картографических и дистанционных методов исследования позволяет утверждать, что предложенный набор морфометрических характеристик рельефа корректно описывает горизонтальную структуру растительного покрова рассматриваемого массива и может быть использован при автоматизированном дешифрировании труднодоступных районов Внутренней Азии, а также при прогнозной оценке трансформаций ландшафтной структуры в результате спонтанных либо антропогенных изменений.

Ключевые слова: структура ландшафта, цифровая модель рельефа, аридное высокогорье, геоморфометрия, индекс TWI, индекс Шеннона

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.8

ВВЕДЕНИЕ

Выявление закономерностей строения и развития природных и природно-антропогенных пространственных структур – одна из основных проблем современного ландшафтоведения. С повсеместным распространением дистанционных съемок существенно расширились возможности изучения пространственных комбинаций геосистем, однако вопросы последующего анализа их динамики, а также оценки роли отдельных факторов ландшафтогенеза в условиях меняющегося климата и растущего антропогенного вмешательства в процессы функционирования геоконструктов остаются весьма актуальными.

В ставших уже классическими работах по ландшафтоведению компонентам геосистем придается равная значимость [Сочава, 1978; Солнцев, 1981] либо признается ведущая роль одного из них. В частности, А.А. Крауклис подчеркивал приоритетное влияние рельефа на вариации количества поступающей солнечной радиации и др. на локаль-

ном уровне организации территории, несмотря на «небольшой радиус действия» [Крауклис, 1979]; а Н.Л. Беручашвили указывал на возможность в отдельных случаях дешифрирования на основе данных дистанционного зондирования горизонтальных границ природно-территориальных комплексов по рельефу [Беручашвили, 1990]. По этой причине рядом исследователей предложено вместо рассмотрения нескольких факторов среды по отдельности использовать количественные характеристики рельефа [Guisan, Zimmerman, 2000].

Поиск связи ландшафтной структуры со значениями количественных параметров рельефа, включая оценку роли рельефа в перераспределении стока, основан на концепции аккумуляции – сноса вещества [Шарый, 2016]. А. Эндал [Aandahl, 1948] предложил при изучении путей стока использовать горизонтальную (плановую) и вертикальную (профильную) кривизны склонов, в связи с тем что вертикальная кривизна характеризует относительное

замедление/ускорение потоков вещества на склонах [Speight, 1974], а горизонтальная – сближение/расхождение линий тока [Kirkby, Chorley, 1967].

В условиях аридных высокогорий основным фактором, определяющим специфику ландшафтной структуры территории, выступает увлажнение, а точнее перераспределение скудного количества атмосферных осадков за счет неровностей рельефа, широкого распространения слабо проницаемых поверхностей, дополнительного притока влаги в результате оттаивания деятельного горизонта многолетнемерзлых грунтов и т. п. Настоящее исследование направлено на выявление особенностей морфологической структуры ландшафтов аридных высокогорий на основе анализа количественных характеристик рельефа.

Высокогорные районы, играющие ключевую роль в формировании стока крупнейших рек,

обеспечении водой бессточных внутригорных территорий и т. п., до сих пор остаются слабоизученными в силу своей труднодоступности, малонаселенности, недостаточного развития транспортной инфраструктуры. В связи с этим представляется крайне важным наличие в регионе участка, достаточно детально и разносторонне исследованного, так как это дает возможность использовать его в качестве модельного для изучения закономерностей функционирования геосистем и решения разнообразных фундаментальных и прикладных задач. Именно поэтому объектом исследования выбрана территория массива Монгун-Тайга (3976 м), расположенного в западной части Республики Тыва, на стыке системы Танну-Ола с хребтами Горного и Монгольского Алтая (рис. 1), подробно изученная специалистами различных направлений.

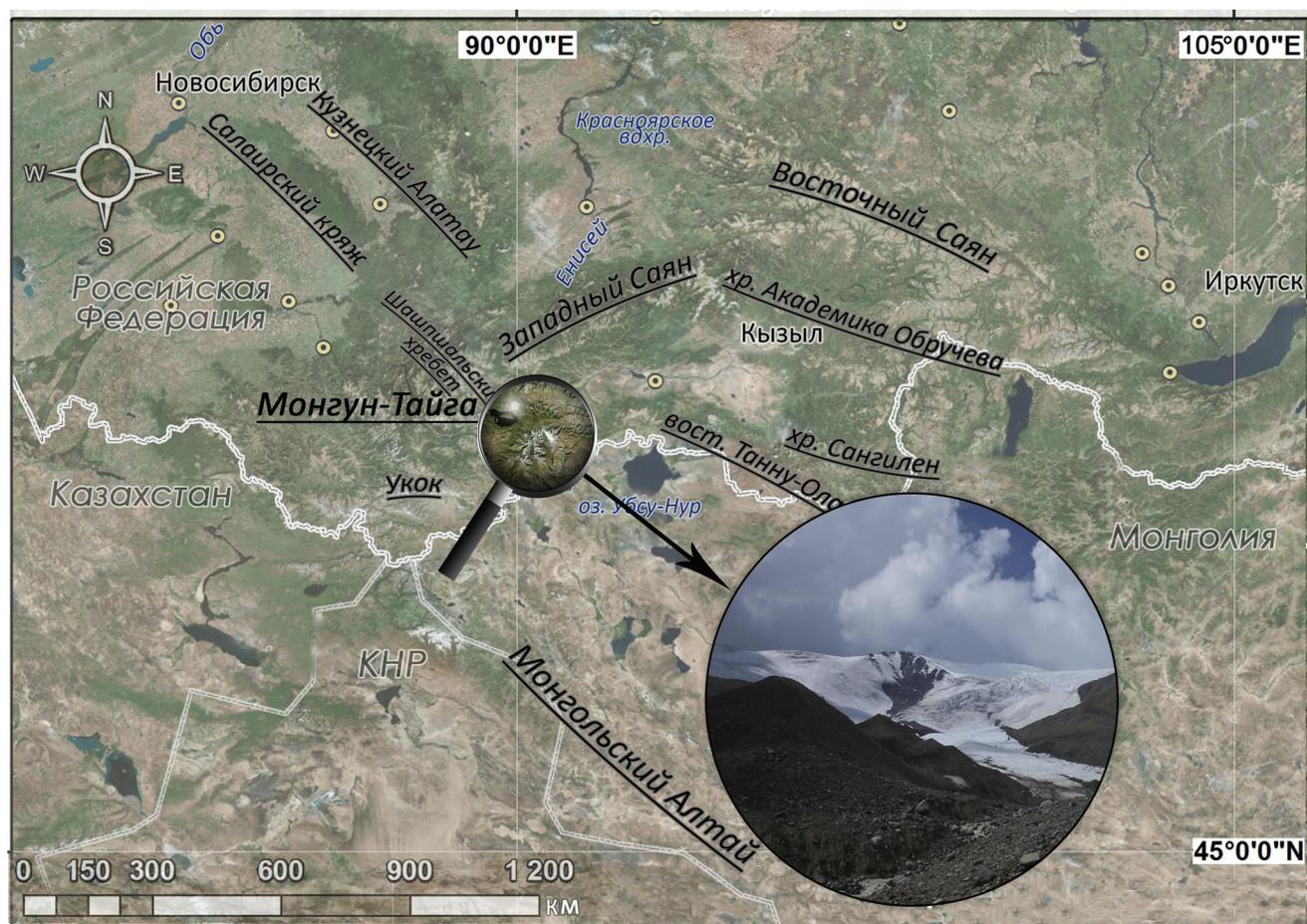


Рис. 1. Район исследования. На врезке – фото вершины г. Монгун-Тайга

Fig. 1. Study area. Inset – top of the Mongun-Taiga massif

Формирование ландшафтной структуры ключевого участка общей площадью более 1 тыс. км², относящегося к бассейну Котловины Больших Озер, обусловлено сочетанием нескольких физико-географических факторов: положением территории

массива на стыке природных зон степей и полупустынь и климатических секторов (континентального и резко континентального), а также разнообразием рельефа территории (представлены как участки сильно расчлененного горного рельефа, так и раз-

ноуровневые поверхности выравнивания, обширные пологие моренные равнины и плоские днища троговых долин рек). Кроме того, вследствие низкой плотности населения, традиционного характера природопользования и включения в 2000 г. территории в состав биосферного заповедника «Убсунурская котловина» из числа факторов, влияющих на структуру ландшафтов, антропогенный можно практически исключить.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Под ландшафтной структурой территории авторы понимают пространственное распределение геосистем локального уровня организации, определенных через местоположения и длительно-временные состояния почвенно-растительного покрова. Местоположения геосистем выделялись по форме рельефа, уклону, типу, составу и мощности поверхностных отложений, а также режиму миграции вещества; длительно-временные состояния определялись как группы растительных сообществ, объединенных по принципу доминирования тех или иных видов растений. Временной аспект ландшафтной структуры в настоящей работе не рассматривался.

Морфометрический анализ территории проводился на основе цифровой модели местности (далее – ЦММ) SRTM (версия 3) с пространственным разрешением 3 угловых секунды [ASTER..., 2020]. В отличие от ЦММ, построенных интерполяцией по топографическим картам или по прямым измерениям высоты, модель SRTM, полученная методами дистанционного зондирования, содержит высокочастотный шум, требующий сглаживания. В качестве фильтра был выбран алгоритм Mesh Denoise [Sun et al., 2007], эффективность применения которого была показана в [Stevenson et al., 2010]. Мультиспектральные снимки высокого пространственного разрешения спутников SPOT-5 и SPOT-6 (группа компаний «СканЭкс») были обработаны ДТМ-фильтром для устранения в первом приближении искажений, вызываемых кронами.

Анализ ландшафтной структуры массива проводился для 200-метровых высотных интервалов отдельно для северного макросклона и южного макросклона в связи со значительным перепадом высот исследуемой территории и морфоструктурными особенностями массива. Полученная на основе цифровой модели база данных состоит из более чем 188 тыс. точек с набором характеристик, включающих, помимо морфометрических характеристик рельефа, информацию о почвенно-растительном покрове.

В качестве инструмента морфометрического анализа в работе использовались два набора количественных характеристик рельефа. Первый (М1)

представлен, помимо высоты, так называемыми локальными морфометрическими величинами – уклоном (крутизной) и полной аккумуляционной кривизной [Shary et al., 2002]. В последнем показателе, представляющем собой произведение вертикальной и плановой кривизны, учитываются оба механизма аккумуляции и сноса вещества [Shary, 1995], которые могут быть описаны значениями вертикальной и горизонтальной кривизны, рассчитанными по формуле Зевенбергена–Торне [Zevenbergen, Thorne, 1987]. Ввиду малых по модулю (порядка 10^{-5}) абсолютных значений аккумулятивной кривизны была проведена процедура нормализации путем деления на стандартное отклонение, что, по сути, эквивалентно стандартному z -преобразованию.

Второй набор морфометрических характеристик (М2) включает, помимо высоты, крутизну и индекс *TWI* (*Topographic Wetness Index*), широко применяемый в науках о Земле и рассчитываемый по формуле [Beven, 1979]:

$$TWI = \ln \frac{CA}{tg \alpha}, \quad (1)$$

где *CA* – водосборная площадь, α – угол наклона (крутизна).

Относительно однородные по количественным характеристикам рельефа участки ЦММ, обособленные по двум комбинациям морфометрических величин на основе квантилей их распределения, в настоящем исследовании называются морфометрическими местоположениями (ММ1 и ММ2 – соответственно набору используемых параметров).

Приуроченность групп растительных сообществ к морфометрическим местоположениям выявлялась по квантилям распределения в каждом диапазоне значений комбинаций морфометрических величин, а затем оценивалась с помощью меры энтропии [Ricotta, Szeidl, 2006; Rocchini et al., 2013], выраженной в виде дискретного набора вероятностей [Shannon, 1948]:

$$H_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (2)$$

где P_{ij} – встречаемость i -й группы растительных сообществ в j -м местоположении, n – число местоположений, выделенных в высотном интервале.

В случае максимального значения энтропии ($H_i = 1$) данная группа растительных сообществ с равной вероятностью может встречаться на любом из местоположений и, стало быть, не дает однозначного представления о ландшафтной структуре местности. При минимальной энтропии ($H_i \rightarrow 0$) в каждом местоположении встречается только одна группа растительных сообществ.

Полученные значения энтропии для каждой группы растительных сообществ усреднялись по высотному интервалу со взвешиванием по занимаемой ими площади:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (3)$$

где H_i – энтропия распределения i -й группы растительных сообществ из (2), S_i – площадь, занимаемая этой группой сообществ в данном высотном интервале.

Проверка корректности использования количественных характеристик рельефа при выявлении степени приуроченности групп растительных сообществ к определенным местоположениям осуществлялась двумя способами: визуально путем наложения раstra ЦММ на ландшафтную карту горного массива Монгун-Тайга масштаба 1:100 000 [Горный массив..., 2012], а также путем сравнения нормированных значений мер энтропии при обязательном условии неравного количества числа градаций местоположений, выделенных разными способами.

$$H_{\text{норм}} = \frac{H_i}{\ln m}, \quad (4)$$

где m – число местоположений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследуемой территории характерны большие амплитуды уклонов и высот: разброс значений уклонов составляет 0–45°, высот – 1800–3950 м, при этом имеет место неравномерное распределение площадей одинаковых высотных ступеней северного и южного макросклонов.

Значения рассчитанных морфометрических характеристик рельефа распределены ожидаемо: максимумы вертикальной кривизны (0,014) наблюдаются вдоль водораздельных линий по гребням, минимумы (–0,0054) – в серединах склонов и на дне относительно узких V-образных долин; максимумы горизонтальной кривизны (0,4) – на выпуклых отрогах, минимумы (–0,96) – в днищах всех долин, включая U-образные троговые. Распределение значений аккумулятивной кривизны имеет более сложный характер.

Все значения количественных характеристик рельефа были разделены по уклону на три диапазона, по квантилям распределения значений аккумулятивной кривизны – на пять. Таким образом, получилось 15 комбинаций морфометрических местоположений ММ1. Аналогично был получен второй набор ММ2 – по диапазонам уклонов и значений TWI .

В ходе проведенных ранее исследований высотной структуры массива было получено распределение местоположений по высотным интервалам в зависимости от макросклона [Гаврилкина и др., 2014]. Применение морфометрических характеристик рельефа позволило выявить приуроченность местоположений к выпуклым/вогнутым участкам внутри высотного интервала. В качестве примера приведено графическое отображение распределения местоположений высотного интервала 2200–2400 м в зависимости от комбинаций морфометрических характеристик (рис. 2). Для наглядности ячейки маркированы пунсоном через каждые 10%. В качестве нижнего порога встречаемости местоположений в настоящей работе принималось значение 5% (число точек в конкретной ячейке от общего числа точек в диапазоне). Для удобства интерпретации результатов все рассчитанные значения TWI были разбиты на пять диапазонов по мере ухудшения дренажа, а именно: 1 – от 4,59 до 6,83; 2 – от 6,84 до 7,57; 3 – от 7,58 до 8,41; 4 – от 8,42 до 9,75; 5 – от 9,76 до 21,29.

Так, если уклоны превышают 15°, то во всех высотных интервалах независимо от диапазона TWI доля среднекрутых склонов S_2 (см. рис. 2) составляет порядка 90% от числа точек конкретной ячейки «уклон – TWI ». Очевидно, что по мере увеличения значений TWI (и, соответственно, ухудшения дренажа) возрастает доля морен, что особенно ярко проявляется на выположенных территориях; при этом при значении TWI , равном 1, морены полностью отсутствуют. Дешифровочным признаком террас, пойм и днищ троговых долин (местоположения Ad и U соответственно) можно считать комбинацию «уклон < 2°/ TWI = 5».

Наложение полей пространственного распределения морфометрических характеристик на ландшафтную карту массива масштаба 1:100 000 показало, что учет крутизны и кривизны позволяет с высокой степенью достоверности определять формы рельефа аридных высокогорий данного региона и, таким образом, существенно снизить субъективность дешифрирования космических снимков за счет частичной замены результатов умозаключений исследователя (например, о генезисе, возрасте и проч.) более объективными количественными характеристиками.

Совпадение участков древесной растительности, оконтуренных на основе спутниковых снимков SPOT, а также установленное повышение точности локализации местоположений при использовании комбинаций количественных характеристик рельефа послужили основанием для предположения о наличии связи растительных группировок с морфометрическими характеристиками рельефа.

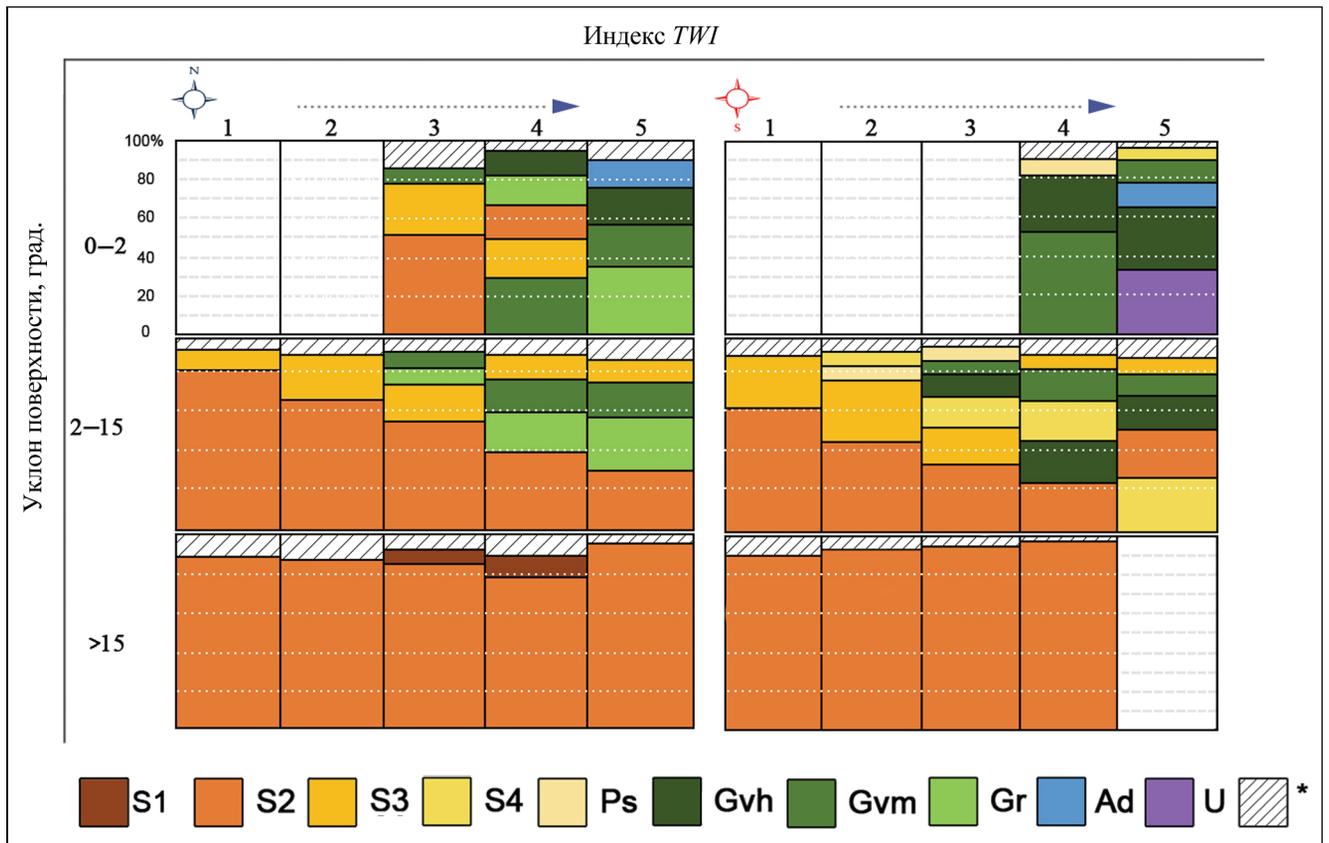


Рис. 2. Распределение местоположений высотного интервала 2200–2400 м в зависимости от комбинаций морфометрических характеристик MM2 (уклон/значения *TWI*) для северного (N) и южного (S) макросклонов: S1 – склоны гравитационного сноса, в том числе осыпи; S2 – среднекрутые склоны с сильным эрозийным расчленением; S3 – пологие склоны делювиального сноса; S4 – склоны делювиальной аккумуляции; Ps – высоко- и среднегорные поверхности выравнивания; Gvh – холмисто-западинные морены вюрмского возраста; Gvm – волнистые поверхности вюрмской морены периода ледникового максимума; Gr – холмисто-увалистые морены рисского возраста; Ad – дренируемые высокие террасы рек и зандры; U – вогнутые переувлажненные участки долин, в том числе террасы, поймы; * – сочетания различных местоположений, занимающих площади ниже порогового значения. Стрелкой показано ухудшение дренажа

Fig. 2. Distribution of locations within the 2200–2400 m altitude interval based on combinations of morphometric characteristics MM2 (slope/ *TWI*) of the northern (N) and southern (S) macroslopes: S1 – gravity drifting steep slope, including slides; S2 – average steepness slope with sharp erosional fragmentation; S3 – deluvial gentle slopes; S4 – deluvial accumulative slopes; Ps – highland planation surfaces; Gvh – hilly-depression wurm moraines; Gvm – rippled wurm moraines glacial maximum; Gr – hilly riss moraines; Ad – drained high river terraces and aprons; U – concave water-logged valleys, including terraces, floodplains; * – combination of different locations, occupying an area below a threshold value. The arrow indicates the degradation of drainage

Анализ полученных значений средней нормированной энтропии, рассчитанной для местоположений, выделенных разными способами (рис. 3), показал заметное снижение меры неопределенности распределения групп растительных сообществ по всему высотному профилю при применении комбинаций морфометрических величин. Это особенно важно в связи с тем, что ранее [Гаврилкина и др., 2014] было показано: для большинства групп растительных сообществ (кроме группировок петрофитов и пойменных лесов) явной связи с местоположениями на основе только высотно-экспозиционного анализа выявить не представляется возможным.

Наиболее заметное уменьшение значений энтропии отмечено в пределах экотонной полосы в диапазоне высот 2200–2800 м [Зелепукина и др., 2018], отличающейся высоким для аридных высокогорий ландшафтным разнообразием. При этом максимальное снижение меры неопределенности отмечается на северном макросклоне в интервале высот 2000–2400 м ($\Delta H_{\text{норм}}$ достигает 0,3 на высоте 2300 м), а на южном несколько выше – 2400–2600 м ($\Delta H_{\text{норм}}$ превышает 0,2 на уровне 2500–2600 м).

Несмотря на некоторые отличия результатов применения морфометрического подхода на различных высотных уровнях и макроэкспозициях склонов, можно с высокой степенью уверенности

утверждать, что в пределах экотонной полосы получено количественное подтверждение приоритетной роли рельефа в перераспределении влаги за счет косвенного учета поверхностного стока через значения *TWI*.

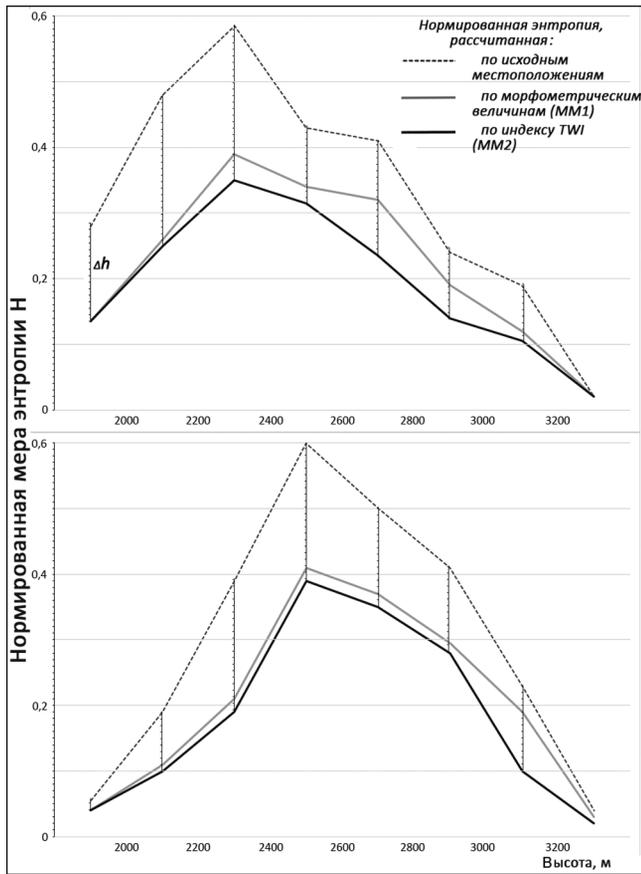


Рис. 3. Графики распределения значений нормированной энтропии групп растительных сообществ, рассчитанной по местоположениям, выделенным разными способами: сверху – для северного макросклона; внизу – для южного макросклона

Fig. 3. Plots of the probable normalized entropy distribution for the groups of plant communities calculated by locations identified in different ways. At the top: northern macroslope; at the bottom: southern macroslope

Одной из проблем дешифрирования растительного покрова высокогорий является скудность снимков высокого разрешения в свободном доступе, в том числе ввиду короткого бесснежного периода. Кроме того, цветовой аспект генеративных органов злаков тундр создает обманчивое впечатление более широкого распространения степей и может привести к завышению оценочных площадей степных сообществ. Именно поэтому для верификации результатов дешифрирования необходимо наличие хорошо изученных эталонных участков. Одним из возможных способов повышения качества дешиф-

рования безлесных высокогорных ландшафтов могут выступать предлагаемые комбинации морфометрических параметров (таблица).

Для данного региона характерно широкое распространение разнообразных тундр, которые можно объединить в две основные группы: ерничовые и шпалерные. Подробное описание состава и структуры группировок растительности приведено в [Зелепукина и др., 2018]. В ходе морфометрического анализа распределения групп растительных сообществ установлено, что осоково-мохово-ерничовые тундры, приуроченные исключительно к избыточно увлажненным участкам морен северного макросклона, совсем не встречаются выше 2700 м, а также при уклонах более 15° и при *TWI* < 2. А вот разнотравно-осоково-ерничовые тундры, преимущественно распространены на среднекрутых (S2) и пологих (S3) коренных склонах в широком диапазоне увлажнения и уклонов и поднимаются выше 3000 м.

Отмечается выраженное преобладание шпалерных тундр на хорошо дренируемых местоположениях. Кроме того, верхняя граница их высотного распределения поднимается выше 3100 м. Особенно ярко это проявляется для разнотравно-осоково-дриадовых тундр, приуроченных по большей части к пологим коренным склонам S3. Распределение разнотравно-кобрезиево-дриадовых тундр носит более сложный характер: они занимают как хорошо, так и слабо дренируемые участки коренных среднекрутых склонов (S2), морен (Gr, Gvm), а также встречаются на поверхностях выравнивания (Ps). Кобрезиево-дриадово-лишайниковые тундры занимают в целом незначительные площади. Можно с уверенностью сказать, что лимитирующим фактором распространения этого вида тундр является значение *TWI* ≤ 5.

Нетипичные для аридных высокогорий луга занимают в высотном распределении аридных ландшафтов значительные площади, создавая экотонную ландшафтную полосу массива. Разнотравные альпийские луга приурочены к слабо дренируемым холмисто-западинным моренам (Gr) и вогнутым переувлажненным участкам троговых долин (U) в диапазоне *TWI* = 3–5. Кобрезиево-разнотравные луга преобладают на хорошо дренируемых среднекрутых коренных склонах (S2); лимитирующим фактором распространения можно считать уклон < 2°. Для злаково-осоково-разнотравных, иногда закустаренных лугов наблюдается четкая приуроченность к хорошо увлажненным местоположениям Ad и U.

Таким образом, полученные параметры распределения в сочетании с доказанным снижением значений энтропии позволяют утверждать, что данный подход заметно повышает качество дешифрова-

ния растительного покрова труднодоступных высокогорных территорий за счет более объективной характеристики распределения группировок растительности. Кроме того, применение морфометриче-

ского подхода дает исключительную возможность повысить достоверность прогнозов трансформации ландшафтной структуры при изменении внешних факторов.

Таблица

Комбинации морфометрических характеристик, определяющие распределение групп растительных сообществ (фрагмент)

| Группы растительных сообществ | | Характеристики рельефа | Зона оптимума | Зона пессимума |
|-------------------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------------|
| Ерниковые тундры | Осоково-мохово-ерниковые тундры | Высота, м | 2300–2500 (N), 2500–2700 (S) | 2200–2300 |
| | | Уклон, град. | 2–15 | <2 |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 4–5 | 3 |
| | | Местоположение | Gr, Gvm | Gvh |
| | Разнотравно-осоково-ерниковые тундры | Высота | 2200–2700 (N), 2500–2900 (S) | 2100–2200, выше 3000 |
| | | Уклон, град. | 2–15 | >15 |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 2–5 | 1 |
| | | Местоположение | S2, S3, Gr | Gvm, Gvh |
| Шпалерные тундры | Разнотравно-осоково-дриадовые тундры | Высота | 2300–2900 (N), 2700–3100 (S) | 2200–2300, 2600–2700 |
| | | Уклон, град. | 2–15 | >15 |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 2–3 | 1 |
| | | Местоположение | S3 | S2 |
| | Разнотравно-кобрезиево-дриадовые тундры | Высота | 2400–2700 (N), 2600–3000 (S) | 2200–2400 |
| | | Уклон, град. | 2–15 | < 2 |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 3–5 (N), 1–3 (S) | 1; 5 |
| | | Местоположение | S2, Gr, Gvm | S2, Ps, Gvm |
| | Кобрезиево-дриадово-лишайниковые тундры | Высота | 2700–2900 | |
| | | Уклон, град. | 2–15 | |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 2–4 | |
| | | Местоположение | S3 | |
| Луга | Разнотравные альпийские луга | Высота, м | 2400–2600 | |
| | | Уклон, град. | 2–15 | >15 |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 3–5 | 2 |
| | | Местоположение | Gr, U | |
| | Кобрезиево-разнотравные луга | Высота, м | 2200–3100 | |
| | | Уклон, град. | >2 | |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 1–2 (N), 1–4 (S) | |
| | | Местоположение | S2 | S3 |
| | Злаково-осоково-разнотравные, иногда закустаренные луга | Высота, м | 2000–2500 (N), 2300–2700 (S) | 1900–2000, выше 2700 |
| | | Уклон, град. | >15 | |
| | | <i>TWI</i> , диапазон | 2–5 | 1 |
| | | Местоположение | S2, S3, Ad, Gvh, U | |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Снижение меры энтропии распределения групп растительных сообществ, рассчитанной по комбинациям морфометрических характеристик, доказывает высокую точность характеристики ландшафт-

ной структуры на основе предложенных наборов морфометрических характеристик (высота, уклон, аккумулятивная кривизна; топографический индекс *TWI*). В этой связи можно рекомендовать применение результатов подобного морфометрического ана-

лиза цифровых моделей рельефа в процессе автоматизированной классификации горных ландшафтов для уточнения границ ландшафтных единиц, интер-

претации материалов дистанционных съемок и прогнозирования трансформаций ландшафтной структуры на качественно новом уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беручашвили Н.Л.* Геофизика ландшафта: учеб. пособие для геогр. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1990. 287 с.
- Гаврилкина С.А., Зелепукина Е.С., Резников А.И., Чистяков К.В.* Высотная структура ландшафтов высокогорного массива Монгун-Тайга // Известия Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 1–4. С. 1063–1072.
- Горный массив Монгун-Тайга / К.В. Чистяков, Д.А. Ганюшкин, И.Г. Москаленко и др. СПб.: Арт-Экспресс, 2012. 310 с.
- Зелепукина Е.С., Гаврилкина С.А., Лесовая С.Н., Галанина О.В.* Ландшафтная структура высотной экотонной полосы высокогорного массива Монгун-Тайга // Известия Русского географического общества. 2018. Т. 150. Вып. 2. С. 33–47.
- Крауклис А.А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 233 с.
- Солнцев Н.А.* Системная организация ландшафтов (Проблемы методологии и теории). М.: Мысль, 1981. 241 с.
- Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Шарый П.А.* Геоморфометрический анализ пространственной изменчивости почв и экосистем: дис. ... д-ра биол. наук. Ростов н/Д, 2016. 319 с.
- Aandahl A.R.* The characterization of slope positions and their influence on the total nitrogen content of a few virgin soils of western Iowa, *Soil Science Society of America Proceedings*, 1948, vol. 13, p. 449–454.
- Beven K.J.* A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Journal Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, vol. 24, iss. 1, p. 43–69.
- Guisan A., Zimmermann N.E.* Predictive habitat distribution models in ecology, *Ecological Modeling*, 2000, vol. 135, iss. 2–3, p. 147–186.
- Kirkby M.J., Chorley R.J.* Throughflow, overland flow and erosion, *International Association of Scientific Hydrology, Bulletin*, 1967, vol. 12, iss. 3, p. 5–21, DOI: 10.1080/02626666709493533.
- Ricotta C., Szeidl L.* Towards a unifying approach to diversity measures: bridging the gap between the Shannon entropy and Rao's quadratic index, *Theoretical Population Biology*, 2006, vol. 70, p. 237–243.
- Rocchini D., Delucchi L., Bacaro G. et al.* Calculating landscape diversity with information-theory based indices: A GRASS GIS solution, *Ecological Informatics*, 2013, vol. 17, p. 82–93, DOI: 10.1016/j.ecoinf.2012.04.002.
- Shannon C.E.* A mathematical theory of communication, *The Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, no. 3, p. 379–423.
- Shary P.A.* Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 1995, vol. 27, no. 3, p. 373–390.
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.* Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 2002, vol. 107, no. 1–2, p. 1–32.
- Speight J.G.* Parametric approach to landform regions, *Institute of British Geographers Special Publication*, 1974, no. 7, p. 213–230.
- Stevenson J.A., Sun X., Mitchell N.C.* Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm, *Geomorphology*, 2010, vol. 114, no. 3, p. 238–252.
- Sun X., Rosin P.L., Martin R.R., Langbein F.C.* Fast and effective feature-preserving mesh denoising, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, vol. 13, iss. 5, p. 925–938, DOI: 10.1109/TVCG.2007.1065.
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R.* Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, vol. 12, p. 47–56.
- Электронный ресурс
ASTER Global Digital Elevation Model Data, URL: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> (дата обращения 08.10.2020).

Поступила в редакцию 19.11.2022

После доработки 14.01.2023

Принята к публикации 22.02.2023

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF LANDSCAPE STRUCTURE IN ARID HIGHLANDS (CASE STUDY OF THE MONGUN TAIGA MOUNTAINS)

E.S. Zelepukina¹, S.A. Gavrilkina², A.V. Terekhov³, A.I. Reznikov⁴

¹ Saint Petersburg State University of Telecommunications, Department of environmental safety of telecommunications, Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: elezelepu@gmail.com

² International Institute for Monitoring Democracy Development and Parliamentarianism, Interparliamentary Assembly of Member Nations of the Commonwealth of Independent States, Saint-Petersburg, Counselor; Ph.D. in Geography; e-mail: svetilnic@mail.ru

³ State Hydrological Institute (Saint Petersburg, Russia), GIS group, team leader; e-mail: antonvterekhov@gmail.com

⁴ Saint-Petersburg State University, Department of Physical Geography and Landscape Design, Senior Lecturer; Ph.D. in Geography; e-mail: ar1725.2@gmail.com

The analysis of the spatial structure of landscapes of arid highlands was carried out by combinations of several morphometric characteristics based on the high-resolution remote sensing data. The choice of the Mongun Taiga Mountains located in the west of the Republic of Tyva (Russia), as a model site, is due to the possibility of verifying the results of morphometric analysis using the extensive material from long-term field studies of the massif. It is shown that the territory could be split into sections relatively homogeneous in terms of relief morphometric parameters in order to describe the locations with a sufficiently high accuracy. It has been established that the entropy of the distribution of plant community groups, averaged over altitudinal intervals, significantly decreases when locations are identified based on combinations of morphometric values for the entire altitudinal profile, regardless of the macroslope.

Combining field trials, cartographic and remote sensing methods makes it possible to assert that proposed set of morphometric characteristics is able to output plant cover horizontal structure. It can be used for automatic interpretation of hardly accessible areas of Inner Asia as well as for the forecast of landscape structure transformation as a result of spontaneous or human-induced changes.

Keywords: landscape structure, digital elevation model, arid highlands, geomorphometry, TWI, Shannon diversity index

REFERENCES

- Aandahl A.R. The characterization of slope positions and their influence on the total nitrogen content of a few virgin soils of western Iowa, *Soil Science Society of America Proceedings*, 1948, V. 13, P. 449–454.
- Beruchashvili N.L. *Geofizika landshafta* [Landscape geophysics], ucheb. posobiye dlya geogr. spets. vuzov. Moscow: Higher School Publ., 1990. 287 p. (In Russian)
- Beven K.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Journal Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, vol. 24, iss. 1, p. 43–69.
- Gavrilkina S.A., Zelepukina E.S., Reznikov A.I., Chistyakov K.V. Vysotnaya struktura landshaftov vysokogornogo massiva Mongun-Taiga [The altitudinal landscapes structure of Mongun-Taiga highland massif], *Izv. Samar'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 16, no. 1–4, p. 1063–1072. (In Russian)
- Gomyi massiv Mongun-Taiga [Mongun-Taiga highland massif], K.V. Chistyakov, D.A. Ganyushkin, I.G. Moskalenko i dr. (avt.), Saint-Petersburg: Art-Ekspres Publ., 2012, 310 p. (In Russian)
- Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology, *Ecological Modeling*, 2000, vol. 135, iss. 2–3, p. 147–186.
- Kirkby M.J., Chorley R.J. Throughflow, overland flow and erosion, *International Association of Scientific Hydrology, Bulletin*, 1967, vol. 12, iss. 3, p. 5–21, DOI: 10.1080/02626666709493533.
- Krauklis A.A. *Problemy eksperimental'nogo landshaftovedeniya* [Problems of experimental landscape science], Novosibirsk: Nauka Publ., 1979, 233 p. (In Russian)
- Ricotta C., Szeidl L. Towards a unifying approach to diversity measures: bridging the gap between the Shannon entropy and Rao's quadratic index, *Theoretical Population Biology*, 2006, vol. 70, p. 237–243.
- Rocchini D., Delucchi L., Bacaro G. et al. Calculating landscape diversity with information-theory based indices: A GRASS GIS solution, *Ecological Informatics*, 2013, vol. 17, p. 82–93, URL: DOI: 10.1016/j.ecoinf.2012.04.002.
- Shannon C.E. A mathematical theory of communication, *The Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, no. 3, p. 379–423.
- Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 1995, vol. 27, no. 3, p. 373–390.
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 2002, vol. 107, no. 1–2, p. 1–32.
- Shary P.A. *Geomorfometricheskii analiz prostranstvennoi izmenchivosti pochv i ekosistem* [Geomorphometric analysis of soils and ecosystems spatial variability], Ph.D. Thesis in Biology, Rostov-na-Donu, 2016, 319 p. (In Russian)
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh* [An introduction to the study of geosystems], Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, 319 p. (In Russian)
- Solntsev N.A. *Sistemnaya organizatsiya landshaftov* [System organization of landscapes], Moscow, Mysl Publ., 1981, 241 p. (In Russian)

- Speight J.G. Parametric approach to landform regions, *Institute of British Geographers Special Publication*, 1974, no. 7, p. 213–230.
- Stevenson J.A., Sun X., Mitchell N.C. Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm, *Geomorphology*, 2010, vol. 114, no. 3, p. 238–252.
- Sun X., Rosin P.L., Martin R.R., Langbein F.C. Fast and effective feature-preserving mesh denoising, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, vol. 13, iss. 5, p. 925–938, DOI: 10.1109/TVCG.2007.1065.
- Zelepukina E.S., Gavrilkina S.A., Lesovaya S.N., Galanina O.V. Landshaftnaya struktura vysokonoi ekotonnoi polosy vysokogornogo massiva Mongun-Taiga [Landscape structure of mountain ecotone belt in the Mongun-Taiga massif], *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva*, 2018, vol. 150, no. 2, p. 33–47. (In Russian)
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, vol. 12, p. 47–56.
- Web source*
ASTER Global Digital Elevation Model Data [Electronic resource], URL: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> (accessed 08.10.2020).

Received 19.11.2022

Revised 14.01.2023

Accepted 22.02.2023