

27. Tishý L. JUICE, software for vegetation classification. *Journal of Vegetation Science*, 2002, vol. 13, pp. 451–453.

28. Tishý L., Chytrý M. Statistical determination of diagnostic species for site groups of unequal size. *Journal of Vegetation Science*, 2006, vol. 17, pp. 809–818.

29. Zelený D., Tishý L. Linking JUICE and R: New developments in visualization of unconstrained ordination analysis. *18th Workshop of European Vegetation Survey in Rome*, Roma, La Sapienza Univerzita Publ. House, 2009, pp. 123.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЛАНДШАФТНО-БАССЕЙНОВОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БИОРАЗНООБРАЗИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Колбовский Евгений Юлисович, доктор географических наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: kolbowsky@mail.ru

Есипова Елена Сергеевна, ведущий специалист, Некоммерческое партнерство «Прозрачный мир», 119021, Российская Федерация, г. Москва, ул. Россолимо 5/22, e-mail: lemna.minuta@mail.ru

В статье излагается опыт моделирования ландшафтных местоположений и элементарных водосборов при помощи инструментария ARCMAP для определения ценных лесов на слабоизученных территориях российского Дальнего Востока. Анализируется возможность оценки потенциальной структуры через ГИС-моделирование его морфолитоогенной основы, так называемых геотопов. Изложены основные этапы процедуры моделирования: выделение районов с однообразным проявлением ландшафтообразующих факторов, построение растровых изображений по основным факторам дифференциации ландшафтов – высоте над уровнем водотока, уклону, экспозиции, положению на склоне, топографическому индексу. Обоснованы принципы морфологического и функционального совмещения двух природных матриц: матрицы ландшафтных местоположений и матрицы элементарных водосборов. Приводится оценка достоверности взаимосвязи между модельными геотопами и данными лесоустройства. Охарактеризованы дискуссионные вопросы и перспективы дальнейшей оптимизации подхода.

Ключевые слова: бассейны, геотопы, грид высот, ландшафт, ландшафтные местоположения, переклассификация, комбинирование, оценка разнообразия

IMPLEMENTATION OF LANDSCAPE-AND-WATERSHED APPROACH FOR POTENTIAL FOREST BIODIVERSITY ASSESMENT BY MEANS OF GEOINFORMATION METHODS

Kolbovskiy Yevgeniy Yu., D.Sc. in Geography, Professor, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: kolbowsky@mail.ru

Yesipova Yelena S., Senior researcher, Non-Profit Partnership "Transparent World", 5/22 Rossolimo st., Moscow, 119021, Russian Federation, e-mail: lemna.minuta@mail.ru

The article deals with the experience of modeling morpholithogenic basics of landscapes (so called «geotopes» – sites) and elementary watershed by means of geographic information systems. The ultimate goal of modeling is to identify potential areas

of valuable forests within the poorly-studied of Russian Far East territories. The basic stages of simulation procedure are: delianation of regions with a monotonous manifestation of the landscape generating factors, plotting raster image for the main factors of landscape differentiation such as – level above the nearest watercourse, slope, aspect, slope position, topographical index. Principles of morphological and functional combination of two natural matrices – matrix landscape locations and the matrix of elementary catchments are denoted. The article provides a brief theoretical justification of the proposed algorithm and describes the basic stages of modeling, questions for discussion and perspectives for further optimization as well.

Keywords: basins, geotope, elevation grid, landscape, landscape sites, reclassification, combination, variety assessment

Постановка проблемы. В последние годы среди специалистов созрело понимание уязвимости и истощимости уникального лесного биома Дальнего Востока, и были сделаны практические шаги к прекращению рубок кедровых лесов и формированию сети особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Накоплено множество данных, свидетельствующих о важности коренных лесов для сохранения биоразнообразия как на генетическом, так и на популяционном уровнях [7]. Однако ввиду нарастающего социально-экономического пресса лесопользование продолжает оставаться конфликтной сферой с недостаточной внутриотраслевой регламентацией и неурегулированными отношениями с другими потребителями разнообразных экосервисных услуг, представляемых лесом. В этих условиях особую актуальность приобретает проблема поиска и выделения особо ценных участков леса, характеризующихся высоким уровнем разнообразия [6].

С современных позиций биологическое разнообразие лесных экосистем (видовое, ценотическое) – функция целого набора факторов, обеспечивающих, во-первых, структурную дифференциацию лесного покрова в пределах ландшафтов, во-вторых, их функциональную связанность в границах элементарных речных бассейнов [8]. Структурная целостность лесного покрова задается абиогенными факторами. Они образуют начальную пространственную дифференциацию среды, формируя разнообразие условий произрастания леса, – местоположений (англ. sites). В данной статье мы будем называть их вслед за А.Н. Ласточкиным геотопами [3]. Мозаика геотопов отражает более-менее устойчивую пластику рельефа территории и (во взаимодействии с другими факторами) формирует характерные рисунки лесного покрова горных склонов, предгорий и равнин, пойменных долинно-речных комплексов.

Функциональная целостность поддерживается процессами переноса вещества и энергии в пределах элементарных водосборов [5]. Сеть водосборов отражает подвижное динамичное (катенарное, стоковое) взаимодействие и взаимосвязь геотопов привершинных и пригребневых поверхностей, различных частей склонов, ложбинно-лощинной и речной сети.

Сочетание и одновременное использование этих двух пространственных матриц позволяет говорить о так называемом «ландшафтно-бассейновом» подходе. В предлагаемой статье описывается опыт реализации ландшафтно-бассейнового подхода посредством разработки полуавтоматизированных приемов картографирования ландшафтных местоположений (геотопов) и речных бассейнов для определения ареалов лесов высокой природной ценности.

Обоснование подхода: геотопы – моделируемый аспект структуры природного ландшафта. Существует множество теоретических репрезентаций природного ландшафта. Однако в рамках данного исследования авторы

стремились использовать представление о ландшафте, позволяющее однозначно моделировать его вещественно-энергетический и топологический каркас. Геотоп – элементарная поверхность, единица дифференциации морфолитогенной основы ландшафта, ограниченная характеристическими линиями рельефа. Данная единица может быть объективно выявлена и оконтурена в процессе преобразований поля высот (грида) и фиксации его производных, определяющих вершины и низшие точки, линии вогнутого (тыловые швы, подножья) и выпуклого (уступы, бровки) перегиба склонов, а также вектора стока [2].

Поскольку рельеф дифференцирует распределение прочих условий среды, на геотопы проецируются характеристики, определенные для Дальнего Востока предыдущими исследованиями [6–8], а именно: температура, влажность воздуха, приход солнечной радиации, снегонакопление, характер коры выветривания и состав подстилающих почвообразующих пород, влияющие на условия дренажа и особенности залегания грунтовых вод и т.д. Таким образом, геотопы задают полный комплекс физических условий существования ландшафта.

Это обстоятельство определило возможность фиксации границ геотопов средствами современных ГИС и проецирования на них наличного комплекса необходимых факторов-параметров. Все это, в свою очередь, позволяет выстроить непротиворечивую реляционную классификацию морфодинамической основы ландшафтов и лесорастительных условий.

В обширном регионе, каковым является российский Дальний Восток, взаимодействие ландшафтообразующих факторов проявляется разнообразно. Три основные группы факторов – природная биоклиматическая (широтная) зональность, меридиональная провинциальность (континентальность и степень влияния океана) и рельеф (высота, пластика и литология поверхности) – сменяют друг друга в роли ведущего фактора ландшафтной дифференциации в каждом данном конкретном месте, во-первых, и в разных масштабах анализа, во вторых.

Разнообразие местных условий произрастания леса определяется реальной неоднозначностью и сменяющейся иерархией взаимодействия ландшафтообразующих факторов. В одном случае главенствующее значение приобретает чередование высотных поясов при движении от речных долин и предгорий к горным хребтам, в другом – определяющим может оказаться распределение осадков и/или тепла, на склонах различной экспозиции. В третьем организующими мозаику ландшафтов факторами выступают морфодинамические особенности рельефа, обуславливающие концентрацию или рассеивание вещества и энергии на склонах. Наконец, важная роль в ряде случаев принадлежит характеру коры выветривания и четвертичных отложений [8].

Мультимасштабность взаимодействия усложняет реальную картину в еще большей степени. Поскольку в одном случае фактор «пластики рельефа» может определять породный состав леса на всем макросклоне хребта, в другом – может «отвечать» за различия смежных концентрирующих и рассеивающих частей одного и того же склона. В этом смысле лесной покров – феномен многомерного и мультимасштабного пространства факторов. Смена ведущего фактора дифференциации ландшафтов и всего характера взаимодействия ландшафтообразующих факторов на фоне мультимасштабности традиционно ставит исследователей перед затруднением, которое (заимствуя известный

гносеологический термин) можно назвать эффектом «ландшафтной неопределенности». Для преодоления последней в данном случае на территории Дальнего Востока, охватывающей несколько широтных природных подзон и меридиональных физико-географических провинций, (различающихся по шкале муссонность-континентальность климата), были выделены ландшафтно-географические регионы с однородным характером взаимодействия ландшафтообразующих факторов.

Материалы и методика картографирования. Метод включает последовательность алгоритмизированных шагов, позволяющих моделировать потенциальную ландшафтную и реальную бассейновую структуры территории, выявить корреляцию этих двух матриц с данными по растительному покрову (типами леса, выделами, либо данными геоботанических исследований) и в итоге выделить ареалы лесов высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ). В качестве исходного материала для выделения геотопов и определения потенциального биоразнообразия по матрице речных бассейнов был использован грид высот (GTOP 30 dataset) территории и стандартные данные лесоустройства в цифровом (векторном) формате.

1. На первом этапе были выделены ландшафтно-географические районы путем полуавтоматической фиксации крупных морфоструктур горных массивов и хребтов, речных долин и озерных котловин, с последующей дифференциацией по зонально-климатическим условиям и распространению основных биомов.

2. Для каждого ландшафтно-географического района строятся тематические растровые изображения, первичные: высотные уровни, уклон, экспозиция, – и производные: топографический индекс [11], растр рек, растр высоты над уровнем рек, направление стока, аккумулированный (накопленный) сток.

3. Для учета принципиально различного набора и характера взаимодействия ландшафтообразующих факторов в пределах водораздельного и долинно-речного комплекса каждый район делится на ареалы речных долин и водоразделов с использованием растров параметров высоты над уровнем реки и эвклидова расстояния до реки.

4. Тематические (пофакторные) растры подвергаются раздельной (для речных долин и водоразделов) классификации и обработке для очистки от «шума». Посредством комбинаторики пофакторных тематических растров производится фиксация границ геотопов в пределах долинно-речного комплекса (уровни поймы, низкие террасы, гривы и межгривные понижения) и горно-водораздельного комплекса (пригребневые, склоновые и прикилевые поверхности).

5. Осуществляется «сшивание» (соединение) долинно-речного и горно-водораздельного растров в единый растр, его векторизация и наделение атрибутами, извлекаемыми из первичных растров. Осуществляется обратный перевод вектора геотопов в атрибутированный растр.

6. Проводится переклассификация растра водотоков для получения звеньев речной сети первого (в кодировке Стралера – Философова) порядка, извлекаются устьевые точки, и моделируется матрица элементарных речных бассейнов.

7. Посредством использования инструмента «зональная статистика» последовательно определяется разнообразием ("variety") элементарных речных бассейнов: сначала – по набору геотопов, затем – по типам леса и доминирующим породам. Определяется разнообразие геотопов по речным бассейнам. Проводится регрессионный и дискриминантный анализ связи между атрибутами местоположения и характеристиками лесоустройства.

Полученные результаты позволяют судить об особенностях реализации разных операций предлагаемого алгоритма, возможном уровне автоматизации, необходимости и характере вмешательства оператора.

Особенности моделирования. Фиксация районов с гомогенным характером взаимодействия ландшафтообразующих факторов по сути представляет собой ГИС-вариант процесса обычного районирования, с той разницей, что границы проводятся не вручную, а с использованием адаптированной утилиты Landform Classification (Jenness) из набора "Topography Tools" для ARCMAP 10.1 [11,12,14]. Адаптация заключалась во введении в расчет характерных диапазонов высот для пяти типов морфоструктур Дальнего Востока: крупные речные долины, обширные низменности, равнины, плато и предгорья, горы и горные хребты. Дальнейшее разделение морфоструктур осуществлялось по параметрам климатической провинции и преобладающего типа биоты. Результат выверялся и корректировался по имеющимся схемам ландшафтно-географического районирования [7].

Сложный, неровный характер границ отдельных районов (рис. 1) объясняется необходимостью выделения территорий, однородных по средневысотным характеристикам и типам рельефа. Поэтому все более-менее значительные долины притоков крупных рек образовали «коридоры», глубоко вдающиеся в водораздельные горные хребты и массивы.

Разделение горно-водораздельного и долинного речного комплекса – нетривиальная задача, которая решается посредством предварительного профилирования. На профиле фиксируются высотные уровни, ограниченные характеристическими линиями рельефа: вогнутыми перегибами (подножья, тыловые швы пойм и террас) и выпуклыми перегибами (уступы плато), которые затем используются далее как ориентир для вычленения долинно-речного комплекса с помощью параметра «высота над уровнем ближайшей реки» (Height above rivers – HAR). Итоговый растр HAR подвергается классификации, позволяющей извлечь весь долинно-речной комплекс (пойма и низкие террасы) и выделить его в отдельное производство.

Эксперименты с разными модельными районами показали, что для фиксации ландшафтных местоположений в пределах долинно-речного комплекса необходимы, как правило, всего два тематических растра (параметра). Один из них, «высота над уровнем ближайшего водотока», позволяет вычленить местообитания с различной высотой над уровнем водотоков, и, следовательно, с различным режимом поемности (частота и длительность заливания) и аллювиальности (потенциальный характер отлагаемых наносов). Другой параметр в зависимости от типа руслового процесса и поймы – либо «уклон» (на сегментно-ступенчатых поймах и низких террасах), либо так называемый «топографический индекс» (Topographic Position Index (Jenness) [12, 13] который работает в условиях сегментно-гравистых пойм и позволяет более надежно дифференцировать рассеивающие пригребневые поверхности глив и концентрирующие прикилевые поверхности межгливных понижений (рис. 2).

В вычленении границ местоположений горно-водораздельного комплекса участвуют высотные уровни, уклон, экспозиция и топографический индекс. При этом важно понимать, что последний используется здесь в других значениях (т.е. классифицируется на иные градиенты чем в речных долинах).

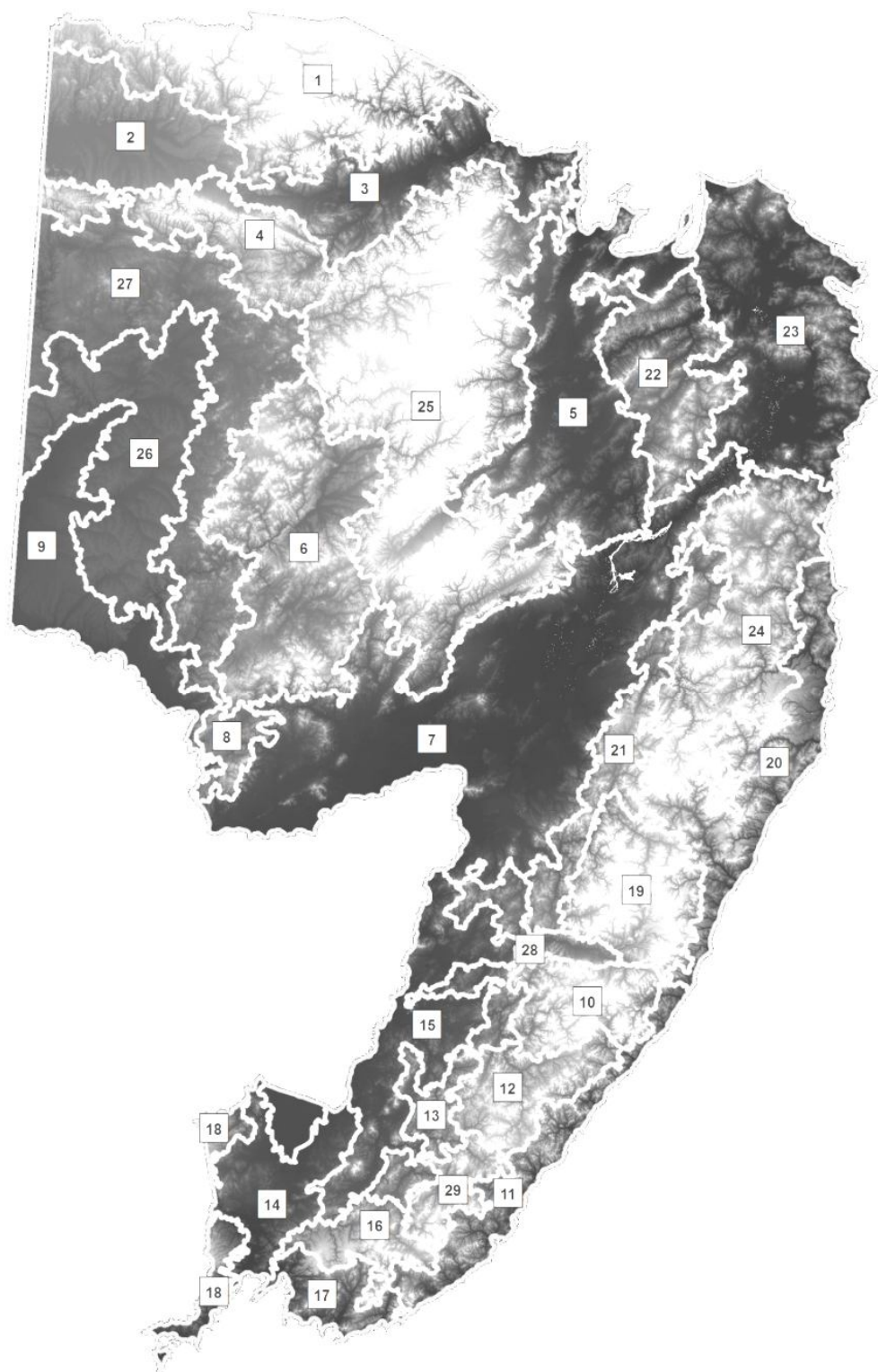


Рис. 1. Ландшафтно-географические районы Дальнего Востока, полученные методом полуавтоматического картографирования. Цифрами от 1 до 29 обозначены номера районов

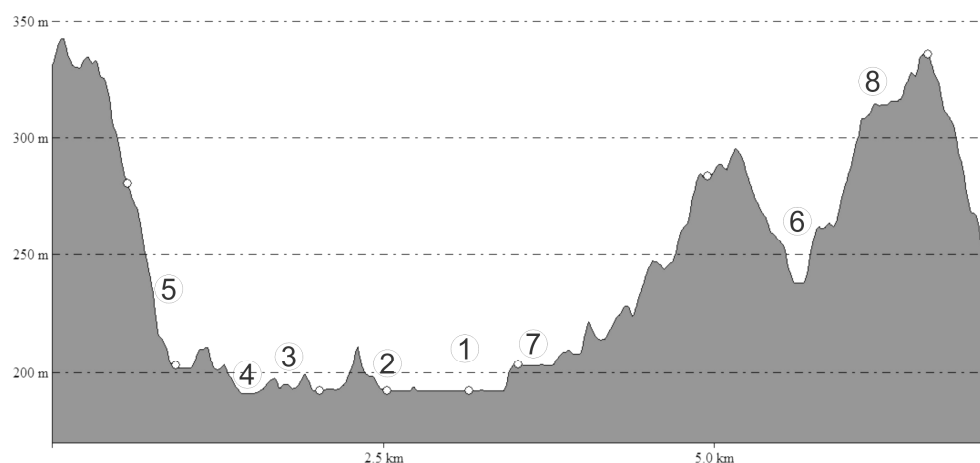


Рис. 2. Профиль для определения градиентов высот долинно-речного и водораздельного комплексов. Цифрами указаны: 1 – основная пойма, 2 – низкая пойма, 3 – гряды поймы, 4 – пойма притока, 5 – склон долины, 6 – верховья притоков, 7 – терраса, 8 – привершинная поверхность

Анализ высотных уровней отражает дифференциацию ландшафтов по высотной поясности и вроде бы должен быть согласован со значениями интервалов высот поясов в конкретных ландшафтно-географических районах. Следует отметить, что сложные системы хребтов и/или нагорий «провоцируют» использовать классификацию первичного грида высот по множеству ступеней. Поскольку возникает иллюзия, что чем более дробно делится горный рельеф на градиенты высотных поясов, тем точнее будет окончательный результат. Однако эксперименты показывают, что это не так: дробная «нарезка» создает впоследствии (при комбинаторике) большое число «пустых» или очень малочисленных таксонов, лишь деформирующих общую картину дифференциации местоположений.

Уклон поверхности определяет потенциальную энергию рельефа и тем самым контролирует проявление всех других факторов (экспозиции, высоты и катенарной локализации) [9]. При классификации раstra уклона также следует избегать формирования слишком большого числа таксонов: даже в пересеченных горных областях достаточными являются пять градиентов, классифицированных опцией «естественные границы» следующим образом: 0–7° (плоскость и пологие склоны), 7–15° (покатые склоны), 15–24° (средне-крутые склоны), 24–54° (крутые склоны), 54–86° (очень крутые и отвесные склоны) – рисунок 3.

Растр топографического индекса – параметр, который в горных и полугорных областях отражает функциональную (гребне-килевую) и катенарную (склоновую) дифференциацию элементарных местоположений ландшафта и позволяет выделить основные хребты и отходящие от них контрфорсы («ребра»), собирающие и концентрирующие части склонов, тальвеги распадков (рис. 4). Хребты Сихотэ-Алиня – уникальные местоположения, как правило, экотоны, где различные типы леса (разных экспозиций) «встречаются» с участками горной тундры. Особенностью долинно-речной сети горных территорий ДВ является широкое распространение так называемых распадков – узких лощин с прилегающими склонами. В них сток осуществляется по каменному руслу-желобу, а формы пойменного рельефа отсутствуют.

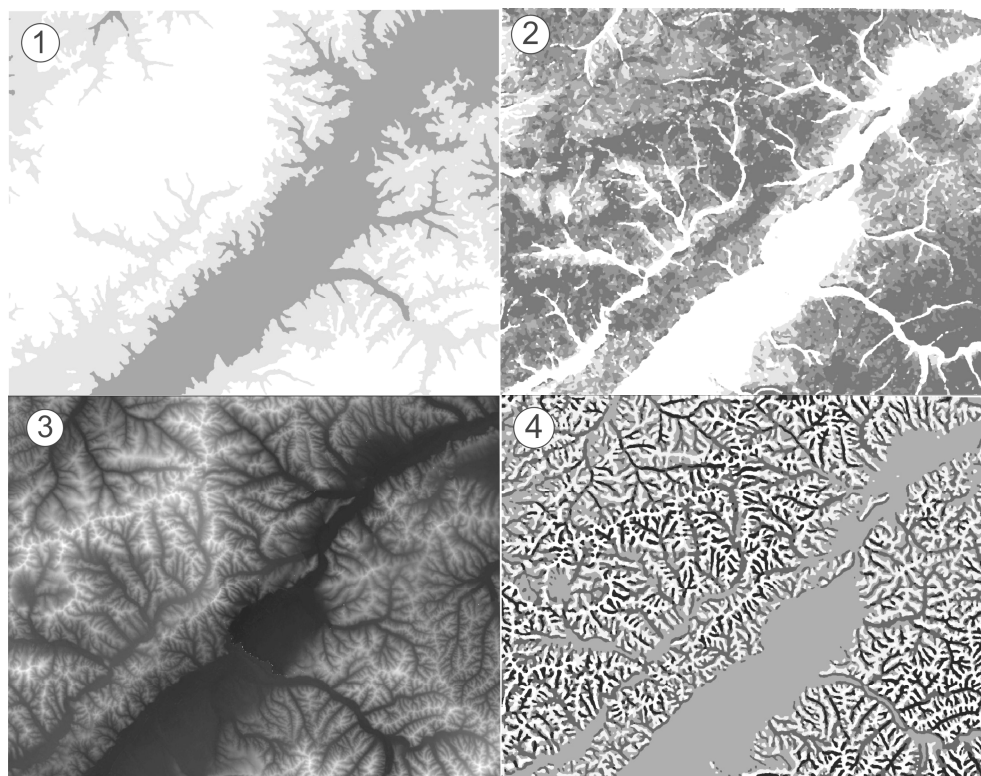


Рис. 3. Четыре классифицированных тематических растра для моделирования геотопов:
1 – высотные уровни, 2 – крутизна склона, 3 – высота над уровнем водотока,
4 – топографический индекс

Особый тематический растр – растр экспозиции. Преобразование грида высот дает разбиение на восемь стандартных рубмов и плоскость. Этот сырой растр обрабатывается для избавления от шума (который «поставляют» незначительные по площади скальные стенки или фрагменты склонов) и классифицируется с целью выявления определенной ориентировки хребтов и «композиции» примыкающих склонов. Если пригребневые поверхности главных хребтов ориентированы «восток – запад», то разделенные отходящими от них контрфорсами «стенки» получают дополнительный северный или южный «разворот».

Комбинаторика тематических растров речных долин и водоразделов производится отдельно. После обработки растров обеих комбинаторик создается единая нумерация геотопов и растры «сшиваются» в единый растр геотопов модельного района. Таким образом, выявляется стабильная картина дифференциации геотопов в рамках морфолитогенной основы ландшафта. Пластика рельефа предполагает набор характеризующих ее параметров, которые относительно постоянны: высота абсолютная и относительная (над уровнем водотока), уклон, направление векторов, отражающих рассеивающие или концентрирующие функции, гребне-килевая «специализация». Непостоянными (меняющимися от модельного района к модельному району) являются факторы экспозиции (в своих обеих ипостасях – тепловой и влажностной), литологического состава отложений (почвообразующих пород) и некоторые иные.

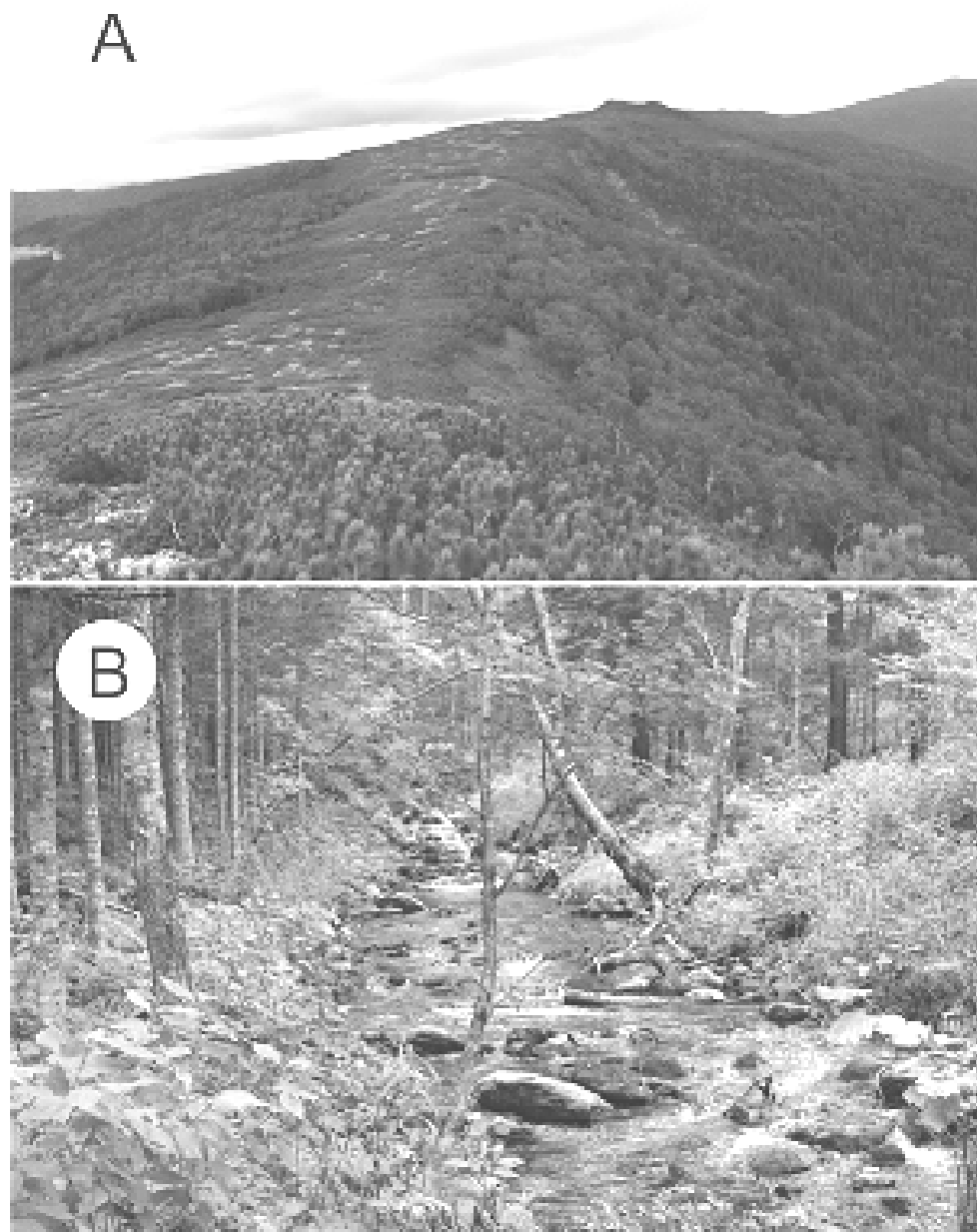


Рис. 4. Пригребневые и прикилевые поверхности фиксируемые параметром «топографический индекс»

Для наделения геотопов любыми (как постоянными, так и переменными) параметрами итоговый грид переводится в полигоны (рис. 5), для последних извлекаются данные исходных гридов, а также любых других имеющихся материалов (скажем растров почвенных или геологических карт). Иными словами, мы можем охарактеризовать каждый геотоп как «тип»: «высокие – пригребневые – рассеивающие – слабонаклонные поверхности», или «сред-

невысотные – прикилевые – крутые – концентрирующие поверхности». По сути, мы получаем базу данных, которую затем можно присоединить к растру геотопов, используя уникальный гридкод.

Данный подход дает возможность создания основы для крупномасштабного ландшафтного картографирования на обширные территории с последующей их детализацией по мере учета непостоянных факторов: экспозиции, увлажнения, литологии и иных. Классифицирование (в терминах реляционной модели) по постоянным факторам может включать любую комбинацию, выбираемую из многомерного объема множества. При этом «кодом» конкретного класса становится сцепление кодов тематических растров, в котором индекс «ведущего» класса ставится на первую позицию.

Любые включенные в атрибутивную базу данные могут быть использованы для переклассификации «на лету». Возможность смены ведущего фактора в реляционной модели демонстрируется классификацией по факторам, учтенным в комбинаторике ARCMAP в разной последовательности. Добавление нового фактора увеличивает общее число таксонов – например, добавление признаков экспозиции даже по пяти обобщенным румбам экспозиции увеличивает общее число таксонов с 48 до почти 150 (но не до 240, поскольку при комбинаторике возникают «пустые множества»).

Сетка элементарных речных бассейнов строилась для малых рек первого порядка (по кодировке Стралера-Философова) с использованием набора «Гидрология» (Spatial Analyst) пакета ARCMAP. В настоящее время речные бассейны считаются полноценной частью биоморфогенеза, если под последним понимать (вслед за Ю.Г. Симоновым) процесс возникновения отдельных форм биосферного формообразования (почвенного и растительного покровов и выделенных в них ценозов) [5]. Бассейны одновременно и структурные, и функциональные единицы биосферы.

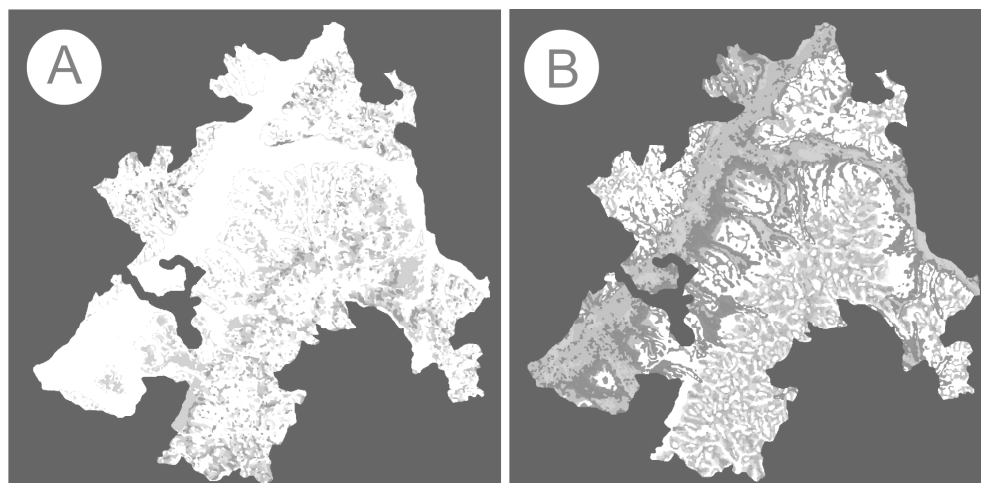


Рис. 5. Пример перестройки «на лету» итоговой матрицы геотопов в зависимости от «назначения» ведущего фактора: А – модель с высотными уровнями («поясностью») в качестве ведущего фактора отчетливо выделяются три пояса, В – модель с гребнекилевой дифференциацией в качестве ведущего фактора (выделены пригребневые и прикилевые поверхности)

Сложность выделения бассейнов любой территории заключается в противоречии между этими двумя свойствами. С одной стороны, результат определения границ речных бассейнов средствами ГИС в полуавтоматическом режиме закономерно связан с масштабом («зернистостью») исходного грида высот. С другой, как показали исследования последних десятилетий, в природе существуют реальные бассейны определенной размерности, которые содержат водоток (а не просто тальвег). Они могут считаться речными бассейнами первого порядка по кодировке Стралера – Философова. Данные бассейны представляют собой функциональную единицу организации стока. Именно с такими бассейнами связаны по размерности ареалы типов леса и (что немаловажно) ареалы хозяйственного освоения [4].

Чтобы определить размерность (длину) реальных истоков верхних звеньев гидрографической сети и отличить их от простых тальвегов (как сухих, так и с эфемерным стоком) использовались ДДЗ и результаты полевых наблюдений (для регионов Сихотэ-Алиня). Для анализа биоразнообразия территории модельных районов региона ДВ были построены бассейны с площадью от 2000 до 7000 га. Бассейны крупных рек при этом разбиваются на бассейны отдельных отрезков течения реки.

Оценка биоразнообразия. Оценка потенциального биологического разнообразия речных бассейнов определялась отдельно: сначала по матрице геотопов и по данным лесоустройства отдельно, а затем – с учетом обоих факторов. Для анализа лесного покрова по данным лесоустройства были построены отдельные тематические растры (тип леса, доминирующие породы, возраст леса и др.).

Собственно анализ разнообразия сети бассейнов выполняется с помощью модуля зональной статистики в ArcMAP. В качестве метрики для анализа берется опция "Variety", то есть число геотопических и растительных контуров в пределах каждого бассейна.

Поскольку размер бассейнов даже одного порядка варьирует в достаточно широком диапазоне, необходимо нормировать показательно разнообразия по площади. В качестве единицы площади предложено использовать размер 1000 га. В результате коэффициенты разнообразия рассчитываются по формуле:

$$K = 1000 \times N/S,$$

где N – число геотопов в пределах бассейна (Variety) из зональной статистики), S – площадь бассейна в гектарах.

Итоговый коэффициент разнообразия бассейнов на основе разнообразия геотопов и растительных контуров рассчитывается по формуле:

$$K = K_g + 2K_v,$$

где K – общий коэффициент разнообразия, K_g – разнообразия геотопов, K_v – разнообразия растительных контуров.

Обсуждение результатов. Сравнение с результатами полевых исследований в различных районах хребта Сихотэ-Алинь показала, что модельная таксономия соответствует реальной дифференциации поверхности, хотя и несколько избыточна. Однако этот недостаток в рамках любого ландшафтно-географического района может быть устранен при появлении надежных полевых данных посредством «слияния» родственных таксонов: фрагментов склонов водоразделов или звеньев ложбинно-лощинной сети.

Анализ степени разнообразия геотопов по бассейнам продемонстрировал, что его наиболее высокий уровень наблюдается в переходных зонах между долинно-речными и низкогорными ландшафтами, а также в среднегорных расчлененных ландшафтах. Кроме того, для речных бассейнов с разной стокоформирующей функций – аккумулярующих, транзитных, сбрасывающих [4, 5] – выявился также дополнительный феномен аналогичности набора геотопов.

Теоретически разнообразие лесных сообществ связано с двумя противоположными понятиями [7, 8]:

- оптимумом произрастания (комплекс условий максимально благоприятный для пород-эдикаторов) – в этом случае порода (например, ель или пихта) захватывают ареал полностью;
- экотонами с неоптимальными условиями, где существует межвидовая конкуренция и возможно совместное произрастание разных пород.

В общем случае экотоны приурочены к переходам от одного высотного пояса к другому (например, от низкогорья к долинам или от среднегорья к низкогорью). Однако в локальном масштабе сетки бассейнов первого – второго порядков максимально благоприятные условия для совместного произрастания перечисленных эдикаторов приурочены к сравнительно небольшим площадям с резко расчлененным рельефом и большим перепадом высот.

Наибольшее разнообразие лесного покрова (также как и в случае с геотопами) привязано к переходным зонам от низкогорий и шлейфов склонов к речным долинам. При этом разнообразие типов леса «опускается» на более низкий топографический уровень террас и пойм. Разнообразие формулы древостоя отражает участие смешанных и сложных типов леса в общем лесном покрове. Для территории Дальнего Востока это участие тем выше, чем ниже оптимальность условия произрастания основных лесообразующих (доминирующих) видов [6, 7]. В этом анализе также проявился дополнительный эффект соразмерности групп типов лесов с элементарными водосборами, что может быть объяснено как природными закономерностями (экспозицией, высотной поясностью), так и характером хозяйственного освоения лесов, тесно связанного с продвижением лесозаготовок во второй половине прошлого века.

Был определен интегральный индекс разнообразия бассейнов как показатель, являющийся прямым свидетельством потенциальной ценности существующих в пределах данных бассейнов лесов.

Бассейны с высоким уровнем биоразнообразия хорошо подходят под понятие «эталонов», поскольку в них наблюдается высокая концентрация геотопического и растительного разнообразия. Но, возможно, что необходимо дополнить их бассейнами, в которых встречаются ландшафтные элементы (геотопы). Они не представлены ни в долинных/пойменных лесах, ни в субальпийском комплексе, ни в «эталонных бассейнах».

Разумеется, биота ландшафта обладает собственной внутренней организацией, проявлением которой являются гар-динамика и сукцессионные смены различного характера. Однако, несмотря на относительную автономность лесного покрова, поддержание природной структуры речных бассейнов с полным набором ландшафтных местоположений – важнейшее условие сохранения биоразнообразия в долгосрочной перспективе. Поскольку только таким образом мы можем обеспечить набор условий, необходимых для восстановления леса после любых нарушений антропогенного или естественного характера.

Закключение. Изложенный алгоритм геоинформационного моделирования потенциального разнообразия на слабоизученных территориях позволяет выделить бассейны или группы бассейнов, которые объединяют долинные и субальпийские комплексы в целые массивы, а также включают в себя повышенное разнообразие геотопов (ландшафтных элементов) и растительности. Охраняемая сеть лесов высокой природной ценности может стать более «репрезентативной» путем включения в нее геотопов, которые не присутствуют в других массивах. Полученные контуры геотопов и речных бассейнов представляют собой законченные стабильные пространственные матрицы и могут быть сетками накопления обработки сравнения и хранения любой другой информации: данных о геологическом строении, почвенном покрове, различных типах антропогенного воздействия и т.д.

Авторы выражают признательность Амурскому филиалу Всемирного фонда охраны дикой природы за поддержку исследований грантом WWF604/RU009622-FY15-17/GLM.

Список литературы

1. Кошкарев А. В. Методика создания цифровой геоморфологической карты Москвы / А. В. Кошкарев, А. В. Маркелов, Д. А. Маркелов, Л. А. Некрасова, С. Ю. Самсонова // Геоморфология. – 2011. – № 2. – С. 55–65.
2. Колбовский Е. Ю. Ландшафтоведение / Е. Ю. Колбовский. – Москва : Академия, 2006. – С. 230–265.
3. Ласточкин А. Н. Морфодинамический анализ / А. Н. Ласточкин. – Ленинград : Недра, 1987. – 256 с.
4. Новаковский Б. А. Эколого-геоморфологическое картографирование Московской области / Б. А. Новаковский, Ю. Г. Симонов, Н. И. Тульская. – Москва : Научный мир, 2005.
5. Симонов Ю. Г. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки / Ю. Г. Симонов, Т. Ю. Симонова // Эрозия почв и русловые процессы. – Москва, 2004. – С. 7–34.
6. Современное состояние лесов российского Дальнего Востока и перспективы их использования / под ред. А. П. Ковалева. – Хабаровск : Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 2009. – 470 с.
7. Суханов В. В. Структура растительных сообществ Сихотэ-Алинского заповедника / В. В. Суханов, Б. С. Петропавловский, Н. А. Чавтур. – Владивосток : Дальнаука, 1994. – 220 с.
8. Старожилов В. Т. Ландшафты Приморского края (Объяснительная записка к карте масштаба 1 : 500 000) / В. Т. Старожилов. – Владивосток : Дальневосточный государственный университет, 2009. – 368 с.
9. Флоринский И. В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.33 / И. В. Флоринский. – Москва, 2010. – 44 с.
10. Blaschke T. Defining landscape units through integrated morphometric characteristics / T. Blaschke, J. Strobl // Landscape Modeling: Digital Techniques for Landscape Architecture / E. Buhmann, S. Ervin (eds.). – Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2003. – P. 104–113.
11. Evans I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? / I. S. Evans // Geomorphology. – 2012. – № 137. – P. 94–106.
12. Jasiewicz J. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms / J. Jasiewicz, T. F. Stepinski // Geomorphology. – 2013. – № 182. – P. 147–156.
13. Klingseisen B. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach / B. Klingseisen, G. Metternicht, G. Paulus // Environmental Modelling & Software. – 2008. – № 23. – P. 109–121.
14. Wiczorek M. Automatic relief classification versus expert and field based landform classification for the medium-altitude mountain range, the Sudetes, SW Poland / M. Wiczorek, P. Migoń // Environmental Modelling & Software. – 2008. – № 23. – P. 109–121.

References

1. Koshkarev A. V., Markelov A. V., Markelov D. A., Nekrasova L. A., Samsonova S. Yu. Metodika sozdaniya tsifrovoy geomorfologicheskoy karty Moskvy [Method for creating a digital geomorphological map of Moscow]. *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2011, no. 2, pp. 55–65.
2. Kolbovskiy Ye. Yu. *Landshaftovedenie* [Landscape Science], Moscow, Akademiya Publ., 2006, pp. 230–265.
3. Lastochkin A. N. *Morfodinamicheskiy analiz* [Morphodynamic analysis], Leningrad, Nedra Publ., 1987. 256 p.
4. Novakovskiy B. A., Simonov Yu. G., Tulskeya N. I. *Ekologo-geomorfologicheskoe kartografirovanie Moskovskoy oblasti* [Ecological and geomorphological mapping of the Moscow Region], Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2005.
5. Simonov Yu. G., Simonova T. Yu. Rechnoy basseyn i basseynovaya organizatsiya geograficheskoy obolochki [River basin and basin organization of the geographical envelope]. *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy* [Soil erosion and channel processes], Moscow, 2004, pp. 7–34.
6. Kovalev A. P. (ed.) *Sovremennoe sostoyaniye lesov rossiyskogo Dalnego Vostoka i perspektivy ikh ispolzovaniya* [The current state of the forests of the Russian Far East and the prospects for their use], Khabarovsk, Far East Forestry Research Institute Publ. House, 2009. 470 p.
7. Sukhanov V. V., Petropavlovskiy B. S., Chavtur N. A. *Struktura rastitelnykh soobshchestv Sikhote-Alinskogo zapovednika* [Structure of plant communities of the Sikhote-Alin Reserve], Vladivostok, Dal nauka Publ., 1994. 220 p.
8. Starozhilov V. T. *Landshafty Primorskogo kraya (Obyasnitelnaya zapiska k karte masshtaba 1 : 500 000)* [Landscapes of Primorsky Krai (Explanatory note to the map of scale 1: 500 000)], Vladivostok, Far East State University publ. House, 2009. 368 p.
9. Florinskiy I. V. *Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya relefa* [Theory and applications of mathematical and cartographic modeling of relief], Moscow, 2010. 44 p.
10. Blaschke T., Strobl J. Defining landscape units through integrated morphometric characteristics. *Landscape Modeling: Digital Techniques for Landscape Architecture*, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2003, pp. 104–113.
11. Evans I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 2012, no. 137, pp. 94–106.
12. Jasiewicz J., Stepinski T. F. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 2013, no. 182, pp. 147–156.
13. Klingseisen B., Metternicht G., Paulus G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. *Environmental Modelling & Software*, 2008, no. 23, pp. 109–121.
14. Wiczorek M., Migoń P. Automatic relief classification versus expert and field based landform classification for the medium-altitude mountain range, the Sudetes, SW Poland. *Environmental Modelling & Software*, 2008, no. 23, pp. 109–121.

**ХАРАКТЕРИСТИКА КРИОГЕННЫХ МИНЕРАЛОВ
ПЕЩЕРЫ ЛЕДЯНОЙ ПАПОРОТНИК (КАЗАХСТАН)**

Кадебская Ольга Ивановна, кандидат географических наук, доцент, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 614007, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а, e-mail: icescave@bk.ru

Головачев Илья Владимирович, кандидат географических наук, доцент, Астраханское отделение Русского географического общества, 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: bask_speleo@mail.ru

В статье даётся описание пещеры Ледяной папоротник, расположенной на северо-восточном берегу озера Индер (Атырауская область, Казахстан). Пещера была обнаружена в мае 2015 г. в ходе экспедиционных работ, проводимых членами секции спелеологии и карстоведения Астраханского отделения Русского географического общества. Она относится к пещерам коррозионно-эрозионного типа и является первой по величине пещерой данного района. Пещера имеет один вход. Она открыта впервые и ранее не была известна местному населению. Работа посвящена описанию