

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК [631.4+630.181]:[574.47+573.7]:519.65

СТРУКТУРА ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА, ПЕДО- И БИОРАЗНООБРАЗИЕ ТЕРРИТОРИИ БЕРЕЗИНСКОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА

© 2022 г. А. Н. Червань^{а, *}, А. Л. Киндеев^{а, **}, А. А. Сазонов^а

^аБелорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030 Беларусь

*e-mail: ChervanAlex@mail.ru

**e-mail: AKindeev@tut.by

Поступила в редакцию 07.02.2022 г.

После доработки 19.04.2022 г.

Принята к публикации 27.04.2022 г.

Выполнена геосистемная типология структуры почвенного покрова Березинского биосферного заповедника и проведена количественная оценка показателей контрастности, сложности и неоднородности почвенных комбинаций. Приведена пространственная дифференциация расчетных и агрегированных значений коэффициента неоднородности структуры почвенного покрова. Дана типологическая характеристика природных условий территории заповедника по идентифицированным закономерно организованным геосистемам: фрагментарным, выпуклым и плоским водоразделам; долинообразным и озеровидным депрессиям; расчлененным прирусловым, центральным и притеррасным поймам. Отмечена неоднородность и локальная выраженность геосистем переходных зон, умеренная неоднородность и количество депрессий неглубоких и пойм центральных и притеррасных, умеренная неоднородность и доминирование водоразделов выпуклых и депрессий глубоких. В геoinформационной базе данных с соблюдением топологических правил выполнена геостатистическая обработка картометрических показателей структуры почвенного покрова и 10 индексов разнообразия почв и растительности, а также расчет парной корреляции при оценке педо- и биоразнообразия территории заповедника. Показано, что наиболее статистически оправданными являются индексы Шеннона, нормированный Шеннона, Джини–Симпсона и латеральной дифференциации. Подтверждением достоверности корреляции педо- и биоразнообразия являются приведенные расчеты значений индексов по группам идентифицированных геосистем. Выполнен регрессионный анализ наиболее коррелируемых индексов с расчетом функциональных зависимостей. Приведено пространственное распределение результатов оценки педо- и биоразнообразия с учетом коэффициентов детерминации между ними, что может служить основой функционального зонирования и территориального планирования допустимой антропогенной нагрузки при управлении особо охраняемыми природными территориями.

Ключевые слова: геосистема, неоднородность и контрастность почвенных комбинаций, индексы разнообразия почв и растительности, геостатистика

DOI: 10.31857/S0032180X22100021

ВВЕДЕНИЕ

Дискретно-континуальный характер почвенного покрова является одной из его отличительных особенностей, вызывающей сложности пространственного анализа и картографирования. Цифровое почвенное картографирование предполагает использование двух основных подходов: прямого и косвенного [18]. Первый базируется на теории вероятности и методах педометрики и геостатистики, рассматривает почвенный покров как непрерывно простирающийся в пространстве набор свойств [28]. Второй – классический, в основе которых лежит представление В.В. Докучаева о почвенной зональности, трансформирующееся в зонально-провинциальное строение и структу-

ру почвенного покрова (СПП) [19]. Широкое распространение теории В.М. Фридланда в исследованиях на территории постсоветского региона [12, 22] сопровождалось одновременным развитием тождественных концепций структурной организации почвы, почвенного индивидуума и педоразнообразия [30].

Рассмотрение СПП и ее операциональных единиц – почвенных комбинаций, как закономерно чередующихся элементарных почвенных ареалов привело к представлению почвенного континуума как набора дискретных объектов, идентификация организации которых успешно реализуется методологией системного (геосистемного – по почвенным комбинациям) подхода

для изучения генезиса почв, оценки ресурсного потенциала и территориального планирования [5, 12]. В Беларуси результаты нескольких туров крупномасштабного почвенного обследования для обоснования мелиоративных мероприятий составили информационную основу цифрового учета особенностей почвенного покрова в формате земельно-информационных систем административных районов. Возможность типологического учета СПП обусловила прикладное значение, обеспечила развитие геосистемного подхода в вопросах устойчивого управления агроландшафтами [20, 21]. Морфометрические характеристики СПП (коэффициенты сложности, контрастности, дробности, неоднородности) начали применяться при почвенных обследованиях [8], корректировке границ рабочих участков, планировании севооборотов и кадастровой оценке сельскохозяйственных земель [7]; позволили проводить сравнительный анализ территорий и углубиться в понимание морфологии почвенного покрова. Например, Сталбовым с соавт. [16] показано, что контрастность почвенного покрова минимальна в условиях озерно-ледникового рельефа, максимальна — в условиях конечно-моренного. Структура почвенного покрова играет значительную роль и в исследованиях эволюции ландшафта, при этом определено, что на микро- и мезоуровнях организации, используя микро- и мезокомбинации, СПП является более информативной с позиций ретроспективной пространственной дифференциации условий почвообразования, формирования ландшафтного каркаса [14].

Отождествление учения о СПП с теорией биоразнообразия, неоднократное заимствование методов изучения педоразнообразия из биологии [6, 15, 25] позволили сформировать концепцию педоразнообразия и применять коэффициенты разнообразия (Шеннона–Винера, Брьюиллона, Симпсона, Жаккара и др.) и соответствующие графические модели для отражения сложности почвенного покрова [10].

Концепция педоразнообразия наиболее полно сформирована в работах Ибаньеса [24, 25], указывающего на прямое и/или косвенное влияние почвы на каждую биотическую структуру, определяя биоразнообразие в глобальном масштабе [23]. Некоторые исследователи определили задачу педоразнообразия, как анализ количества и сложность предварительно классифицированных почвенных образований и их свойств в геосистемах [25, 27]. Пространственная неоднородность СПП является параметром педоразнообразия, прямо пропорционального биологическому разнообразию [26]. Недавние изыскания в лесах умеренного пояса Центрально-Европейского нагорья показали линейную регрессионную зависимость между разнообразием почвенных групп и разнообразием лесных растений на уровне >50%,

что значительно превысило влияние геоморфологических условий или химических свойств почв [31]. В ряде исследований отмечается тесная связь педоразнообразия с геоморфологической эволюцией пойменных ландшафтов [29], взаимное дополнение педоразнообразия в таксономическом отношении и вариабельности свойств почв в количественном выражении для характеристики почвенного покрова [10].

Активное развитие теории СПП российскими учеными постепенно вовлекло вопросы педоразнообразия в сферу исследовательских интересов. Оценка разнообразия почв Арктики и Субарктики России выявила увеличение разнообразия при переходе от зоны арктических почв к подзоне арктотундровых почв Субарктики с увеличением размеров почвенных ареалов [15]. Рассматриваются методические аспекты картографирования педоразнообразия, его зависимость от классификационных подходов [6].

В настоящее время исследования педоразнообразия начинают выходить из области фактологического описания результатов и посвящены вопросам эволюции почв, влияния на биоразнообразие, а также сравнительно-географическим аспектам изучения территорий [10]. Установление сильной корреляции и степенной зависимости между педо- и биоразнообразием на планетарном уровне [25] не сняло вопрос о взаимосвязи этих систем на мезо- и микроуровнях — один из актуальных в педометрике [32]. Указанные причинно-следственные взаимосвязи и их интерпретация в аспекте геологических и геоморфологических условий являются основой для развития концепции общего георазнообразия [24].

Важно отметить, что в отличие от агрономических потребностей в наиболее однородных по СПП (следовательно, почвенным свойствам) участках, для ландшафта и природно-территориальных систем (например, заповедника) почвенное (биологическое) разнообразие является критерием возможности их устойчивого функционирования.

В Беларуси единый подход к кодированию почвенной информации в базах земельно-кадастровых данных [17] позволяет оперировать ими как “большими данными”, подключая методические и инструментальные средства геостатистики и педометрики. Геосистемный анализ СПП по цифровым почвенным картам позволяет по установленной методике [12] идентифицировать почвенные комбинации и использовать картометрические коэффициенты неоднородности для целей территориального планирования [20], например, формирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия на основе мультимасштабной оценки неоднородности почвенного покрова [21].

Несмотря на активное развитие геостатистических методов в цифровой почвенной картогра-

фии и использование геосистемного подхода к почвенному покрову, как к дискретно-континуальному телу в рамках теории СПП, отмечается малое количество работ по оценке педоразнообразия и его корреляции с биоразнообразием. При этом проводились обследования охраняемых природных территорий, затрагивались вопросы генезиса почвенного покрова и биологического разнообразия [11] Беловежской пуши, особенности геосистем и экотонов Березинского биосферного заповедника (ББЗ) [1] и типы земель национального парка “Браславские озера” [2]. Несмотря на большой фактологический материал указанных изыскательских работ, ни в одной из них не приводится анализ количественных показателей СПП и почвенного разнообразия, что, видимо, обусловлено развитием геоинформационных технологий обработки данных.

В предлагаемом исследовании средствами автоматизированного геоинформационного анализа цифровых почвенных и геоботанических данных приводятся результаты морфометрического анализа СПП ББЗ. В границах идентифицированных почвенных комбинаций оценивается педоразнообразие, приводится его интерпретация относительно показателей биоразнообразия. Настоящая работа направлена на анализ пространственного распределения расчетных картометрических показателей структуры почвенного покрова и 10 индексов разнообразия почвенного покрова и растительности с учетом коэффициентов детерминации между ними в комбинациях СПП.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Геоинформационная база данных на территории ББЗ основана на цифровой почвенной информации в М 1 : 50 000 на уровне почвенных разновидностей (данные Геопортала земельно-информационной системы Беларуси, 2021) [17], материалах лесоустроительной таксации по выделам и кварталам в М 1 : 25 000 (предприятие “Белгослес”, 2018), локализации родов ландшафтов в М 1 : 100 000 (Д.М. Курлович и соавт., 2018), идентифицированных сотрудниками Белгосуниверситета по редким и типичным ландшафтам заповедника (рис. 1).

Общая характеристика территории. Березинский биосферный заповедник располагается в северной части Республики Беларусь, на границе Витебской и Минской областей. Площадь парка составляет 84,3 тыс. га. Естественные болота заповедника занимают 52,0 тыс. га (61,7%), что делает его одним из крупнейших болотных массивов в Европе. Геоморфологический облик территории сформирован Московским и Валдайским оледенениями, определившими субмеридиональное расположение болотных массивов заповедника вдоль верховьев р. Березины.

В связи с высоким местным уровнем базиса эрозии значительно влияние речной сети на СПП ББЗ: по территории заповедника протекает р. Березина и ее притоки Великая, Липа, Мрай, Сергуч, а также более 70 мелких водотоков, обуславливающих формирование пойменных почв (Fluvisols). Автоморфные дерново-подзолистые почвы легкого гранулометрического состава (Albic Retisols (Arenic) в системе WRB) возвышенных участков конечно-моренных гряд сменяются ниже по гипсометрическому уровню на дерново-подзолистые заболоченные почвы (Albic Gleyic Retisols). Минеральные почвы сложены преимущественно водноледниковыми песками и супесями с отсутствием водоупорного горизонта при двухчленном строении профиля. Торфяно-болотные (Hemic/Fibric Histosols) и торфяно-глеевые почвы (Gleyic Histosols), образованные в котловинах гравитационного стока влаги разной глубины, формируют наибольшие в регионе массивы низинных болот.

Доминирующими ландшафтами являются озерно-болотные, занимающие 54,1% территории заповедника. Значимо меньшую долю составляют водно-ледниковые (17,7%), ландшафты речных долин (14,3%) и камово-моренные (9,8%). Удельный вес озерно-аллювиальных и моренно-озерных ландшафтов с редким участием эоловых гряд в совокупности составляет 4,1% территории ББЗ (рис. 1б).

Растительность заповедника представлена четырьмя генетическими группами лесных формаций: бореальные хвойные (53,1% лесопокрывной площади), лиственные болотные (35,6%), лиственные вторичные (10,6%) и широколиственные (0,7%). По особенностям природных условий и соотношению растительных сообществ в ББЗ можно выделить три луговых района: поймы рек Березина, Сергуч и внепойменные травяные луга. Древесная растительность низинных болот представлена *Alnus glutinosa*, *Betula pubescens*, *Picea* sp., реже *Pinus* sp. Наиболее типичные представители низинных болот: *Carex elongata*, *Carex acuta*, *Carex vesicaria*, *Phragmites australis*, *Calla* sp. На переходных болотах преобладают сосновые и пушистоберезовые осоково-сфагновые сообщества. Лесные верховые болота представлены пушицево-сфагновой, пушицево-кустарничково-сфагновой и багульниково-сфагновой ассоциациями сосняка сфагнового. На безлесных верховых болотах распространены кустарничково-пушицево-сфагновые, осоково-сфагновые и шейхцериево-сфагновые ассоциации.

Методика исследования. Системный подход к идентификации геосистем, отражающих природную специфику территории, был реализован через компонентный состав, геометрию почвенных ареалов и долю их участия в почвенной комбинации [12] и послужил базисом геостатистического

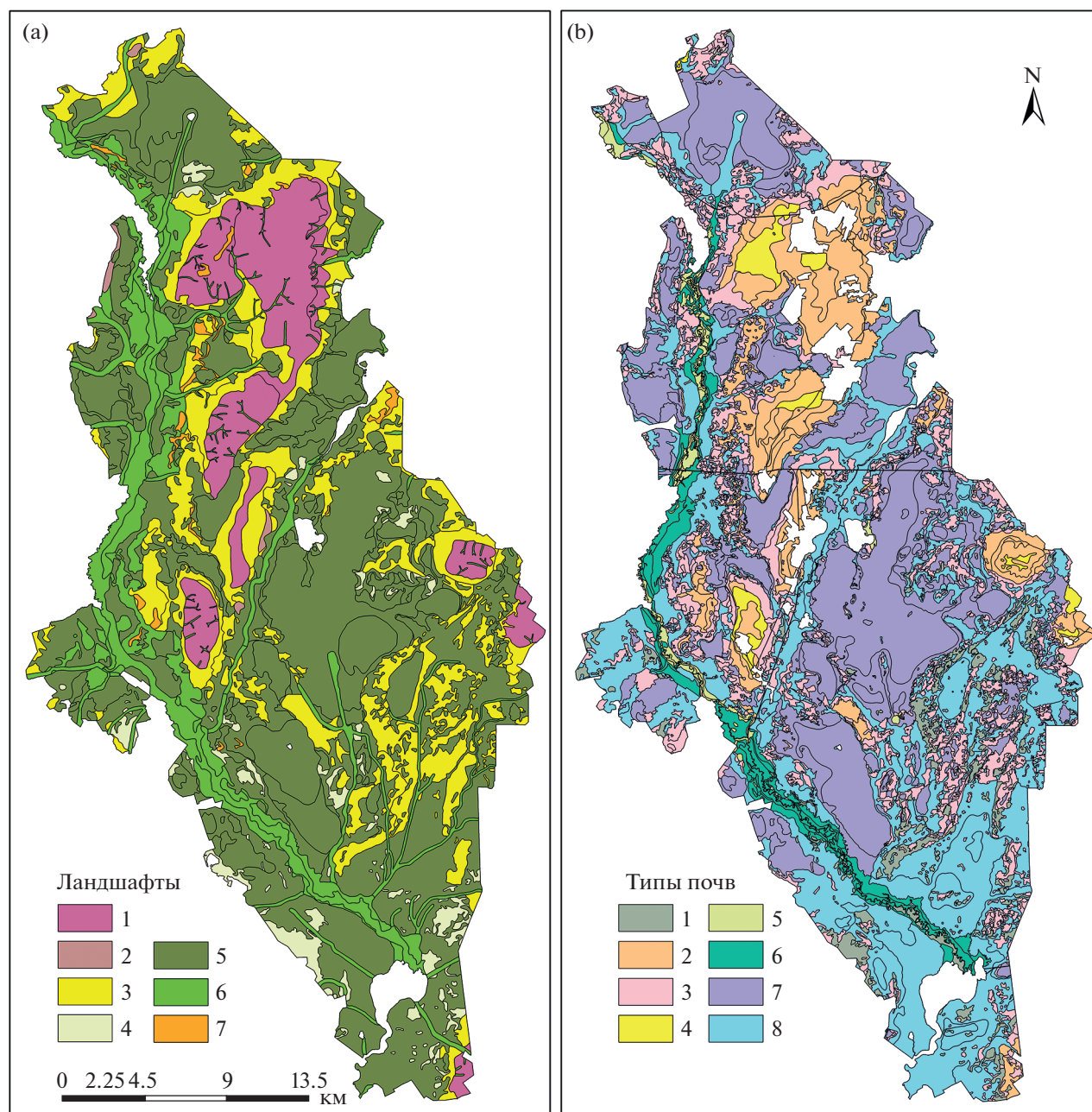


Рис. 1. Ландшафтная (а) и почвенная (б) карты Березинского биосферного заповедника. *Ландшафты:* 1 – камово-моренные; 2 – моренно-озерные; 3 – водно-ледниковые; 4 – озерно-аллювиальные; 5 – озерно-болотные; 6 – речных долин; 7 – эоловые гряды. *Типы почв* [17]: 1 – дерновые заболоченные; 2 – дерново-подзолистые; 3 – дерново-подзолистые заболоченные; 4 – подзолистые; 5 – аллювиальные (пойменные) дерновые; 6 – аллювиальные болотные; 7 – торфяно-болотные верховые; 8 – торфяно-болотные низинные.

анализа неоднородности СПП и педоразнообразия. Почвенные комбинации на территории Березинского биосферного заповедника представлены сочетаниями (в терминологии В.М. Фридланда) групп элементарных почвенных ареалов, за исключением переходных зон – комплексов, включающих геосистемы в качестве самостоятельных компонентов. Инвариантность геосистем как организованного единства инертных и

биотически активных компонентов окружающей среды [4, 8], явилась основанием для поиска корреляционных связей показателей педо- и биоразнообразия.

В ГИС-среде каждая геосистема представлена кодом, в котором зашифрованы общая динамика природных процессов, орографические (1 знак), геоморфологические (2) и гипсометрические (3) условия и литологическое строение (4), оценива-

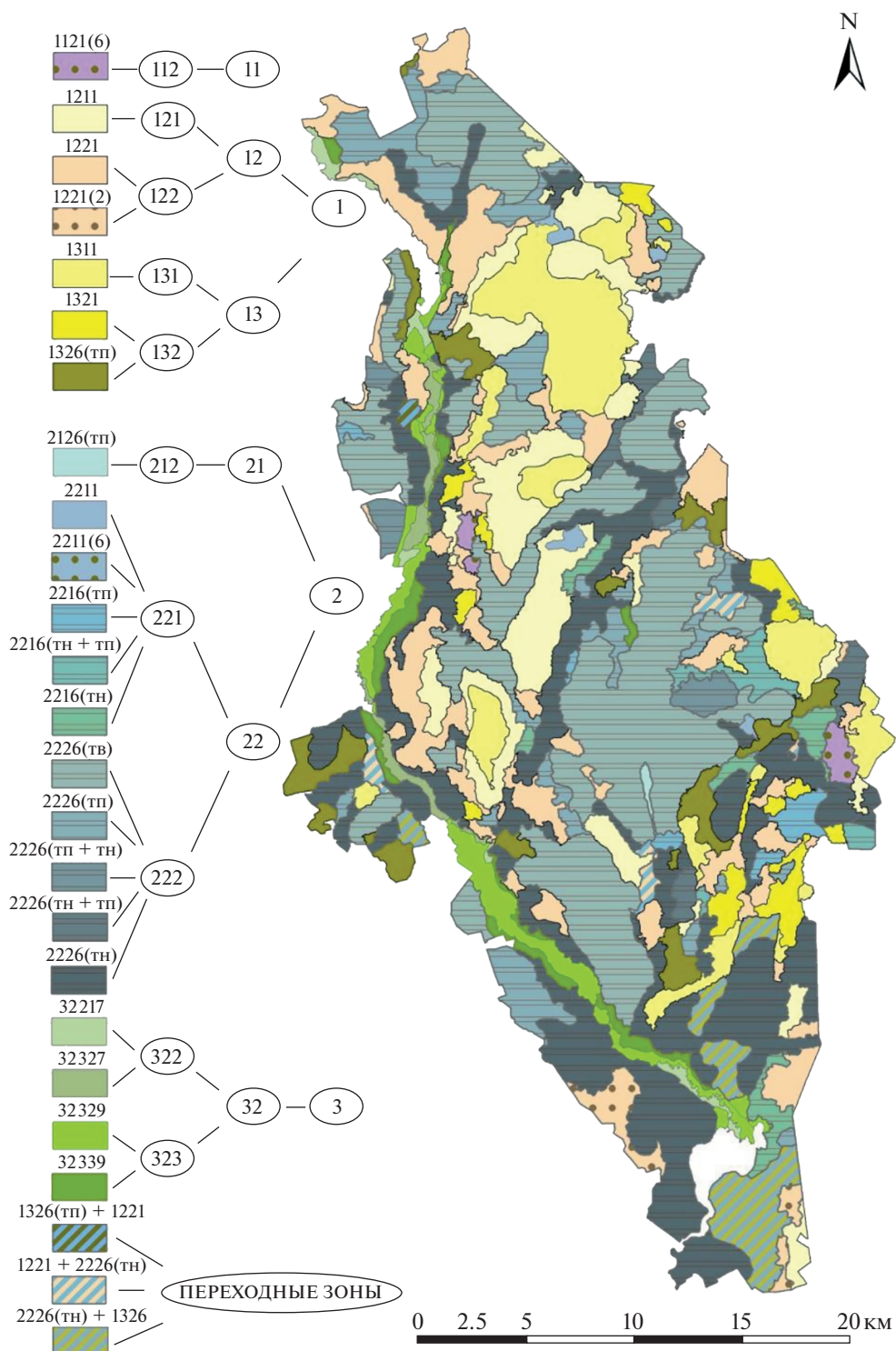


Рис. 2. Карта геосистем Березинского биосферного заповедника. Водоразделы фрагментарные низкие на рыхлых почвообразующих породах заторфованные – 1121(6); водоразделы выпуклые высокие – 1211 и выпуклые низкие – 1221 на рыхлых почвообразующих породах, чередующихся с двучленным строением без водоупора – 1221(2); водоразделы плоские высокие – 1311 и плоские низкие – 1321 на рыхлых почвообразующих породах; водоразделы плоские низкие с преобладанием торфяно-болотных почв переходного типа – 1326(тп); депрессии долинообразные глубокие с преобладанием торфяно-болотных почв переходного типа – 2126(тп); депрессии озеровидные неглубокие на рыхлых почвообразующих породах – 2211, оторфованные – 2211(6), с преобладанием торфяно-болотными низинного – 2216(тн) или переходного – 2216(тп) типа почв; депрессии озеровидные глубокие с преобладанием торфяно-болотными низинного – 2216(тн), верхового – 2216(тв) или переходного – 2216(тп) типа почв; поймы расчлененные центрального высокого – 32217, среднего – 32227 уровня на рыхлом аллювии; поймы расчлененные притеррасные среднего – 32329 и низкого – 32339 уровня оторфованные; переходные зоны – 1221 + 2226(тн), 1326(тп) + 1221, 2226(тн) + 1326.

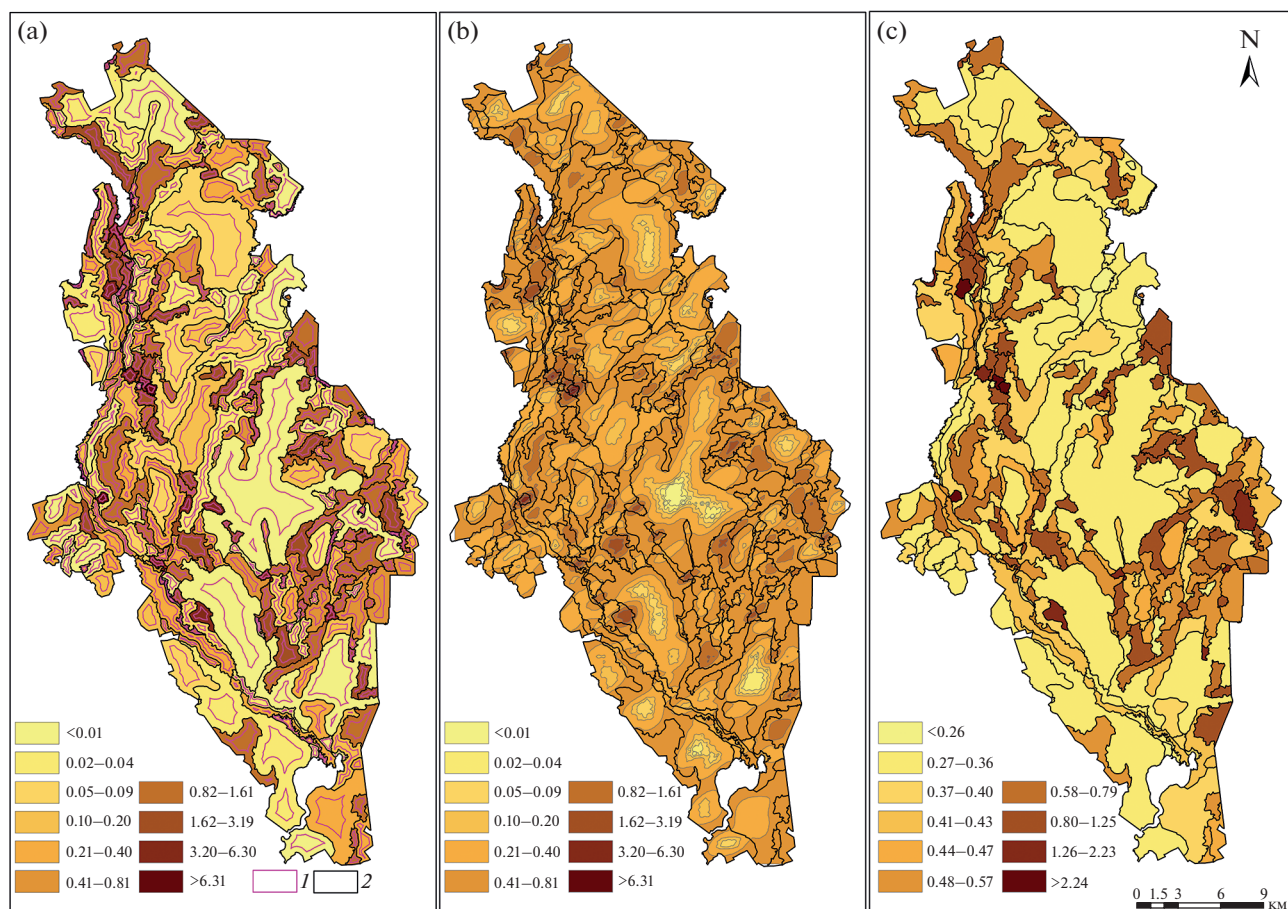


Рис. 3. Неоднородность почвенного покрова заповедника: а – рассчитанный КН; б – интерполяция КН; с – агрегированный КН. 1 – границы “ядер” геосистем; 2 – границы геосистем.

емые по СПП (рис. 2, 3). В частности, на геоморфологическом уровне “пятнистый”, “лопастной” или “сетчатый” рисунок СПП определяют соответственно плоские, выпуклые или фрагментарные водораздельные территории (“водоразделы”) [12]. Внепойменные геосистемы имеют четырехуровневый код, пойменные – пятиуровневый в связи с дополнительной дифференциацией пойм на приустьевую, центральную и притеррасную части. Закодированная таким образом типология геосистем обеспечила возможность группировки значений показателей педо- и биоразнообразия для качественного корреляционного анализа.

Картометрический анализ СПП выполнен по расчетным формулам коэффициентов сложности, контрастности и неоднородности [13] (табл. 1). Контрастность почвенного покрова определяет степень качественной дифференциации почв и определяется в соответствии с методикой [22]. Оценка разнообразия почвенного покрова и растительности проводили по следующим индексам: видового богатства – Маргалефа (DMg) и Менхеника (DMn); доминирования – Бриллюэна (НВ)

Симпсона (D2), Бургера–Паркера (d), Макентоша (D1); разнообразия – Шеннона (SHDI), нормированному Шеннона (SHEI), Джини–Симпсона (G); латеральной дифференциации (ild) [15]. Оценка взаимосвязи индексов проводили с помощью корреляционного анализа с использованием коэффициента корреляции Пирсона (табл. 2). Теснота корреляционных связей между одноименными индексами служила критерием для их использования в итоговой интерпретации результатов пространственной оценки педоразнообразия (рис. 6).

Все формулы переведены в модели геообработки, представляющих собой наборы инструментов обработки географических и связанных данных (баз данных), с помощью инструментария ModelBuilder в программной среде ArcGIS, это позволило автоматизировать расчет коэффициентов и индексов для каждой отдельной геосистемы заповедника. Для учета континуальности пространственного распределения автоматизировано рассчитанных показателей неоднородности и разнообразия с помощью площадной интерполя-

Таблица 1. Неоднородность структуры почвенного покрова Березинского биосферного заповедника

Код (индекс) геосистемы*	Контуры		Средние расчетные значения			Агрегированные значения КН		
	количество	средняя площадь	КС	КК	КН	минимум	максимум	среднее
1121(6)	3	168.24	0.29	15.63	5.52	0.87	3.92	2.04
1211	22	346.28	0.10	4.60	0.64	0.09	1.23	0.49
1221	48	192.96	0.20	10.81	2.14	0.22	2.70	0.99
1221(2)	4	238.96	0.17	9.28	1.67	0.47	1.01	0.64
1311	15	477.90	0.08	3.36	0.33	0.28	1.00	0.46
1321	13	160.32	0.18	3.68	0.71	0.12	0.86	0.51
1326(тп)	15	254.41	0.14	8.12	1.11	0.28	1.15	0.63
2126(тп)	1	81.28	0.12	2.95	0.35	0.41	0.41	0.41
2211	3	96.33	0.12	11.27	1.32	0.36	0.74	0.59
2211(6)	1	53.16	0.10	5.42	0.56	0.57	0.57	0.57
2216(тн)	6	214.08	0.12	11.16	1.55	0.43	1.02	0.74
2216(тн + тп)	3	277.54	0.13	9.55	1.22	0.66	0.79	0.72
2216(тп)	5	149.9	0.12	7.43	0.96	0.27	0.75	0.60
2226(тв)	15	1239.8	0.03	0.83	0.03	0.28	0.42	0.33
2226(тн)	35	456.2	0.04	1.06	0.07	0.15	0.48	0.37
2226(тн + тп)	4	290.8	0.05	3.97	0.22	0.28	0.43	0.36
2226(тп)	23	210.3	0.07	2.34	0.23	0.04	0.62	0.37
2226(тп + тн)	3	305.5	0.06	2.72	0.17	0.33	0.46	0.41
32217	6	87.7	0.20	4.73	1.13	0.33	1.11	0.65
32227	4	182.4	0.20	4.01	0.84	0.44	0.84	0.59
32329	12	197.2	0.14	3.97	0.96	0.10	4.32	0.78
32339	10	139.9	0.08	2.38	0.31	0.19	0.66	0.41
1221 + 2226(тн)	5	120.92	0.13	13.41	1.78	0.52	1.43	0.81
1326(тп) + 1221	1	108.40	0.16	24.81	4.00	2.85	2.85	2.85
2226тн + 1326	5	512.4	0.06	3.86	0.24	0.36	0.42	0.39

*Индексы приведены в легенде к рис. 2.

Примечание. КС, КК, КН – коэффициент сложности, контрастности и неоднородности СПП соответственно. тн, тп, тв – торф низинного, переходного и верхового типа соответственно.

Таблица 2. Корреляция показателей СПП и индексов разнообразия на территории Березинского биосферного заповедника по 262 геосистемам

Коэффициент*	D2	SHDI	SHEI	НВ	G	DMg	DMn	D1	d	ild
Педоразнообразие										
КК	0.06	0.64	0.69	0.18	0.63	0.10	0.05	-0.11	-0.13	0.40
КС	0.09	0.48	0.59	0.00	0.48	-0.07	-0.05	-0.09	-0.01	0.19
КН	0.04	0.52	0.59	0.07	0.51	0.03	0.02	-0.06	-0.07	0.29
Биоразнообразие										
КК	-0.17	0.53	0.53	0.17	0.47	0.25	0.23	0.07	-0.26	0.39
КС	-0.20	0.27	0.40	-0.13	0.26	0.00	0.14	0.23	-0.10	0.13
КН	-0.16	0.36	0.44	0.02	0.33	0.10	0.16	0.13	-0.16	0.24

*КС, КК, КН – коэффициенты сложности, контрастности и неоднородности СПП соответственно.

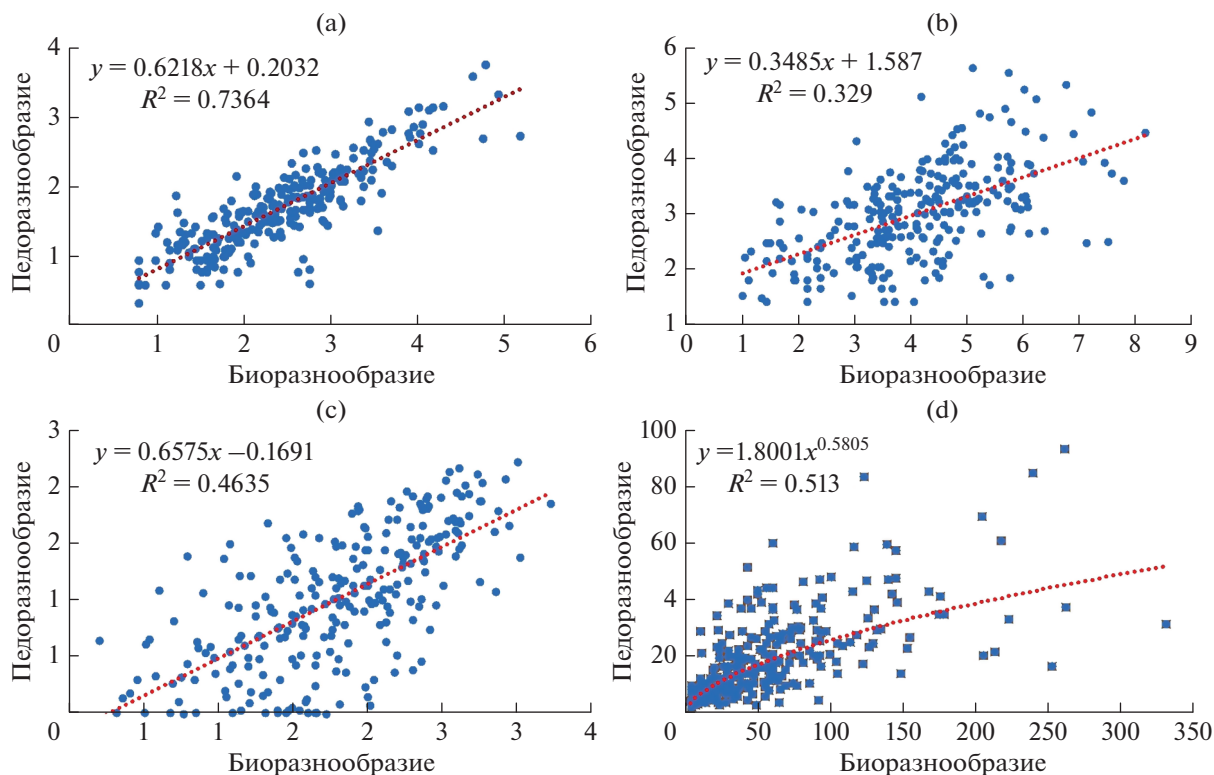


Рис. 4. Линейная регрессия индексов разнообразия: а – НВ; б – DMg; с – SHDI; д – ild.

ции геостатистики были получены карты непрерывного распределения показателей (рис. 4в). Дальнейшее обратное агрегирование (объединение) значений с учетом размеров центральной части (“ядра”) каждой геосистемы (рис. 4а) позволило привести данные к нормальному распределению и соответствию с общей структурой функционирования исследуемого объекта. Границу “ядра” устанавливали отрицательным буфером, являющимся расстоянием, отложенным от границы объекта внутрь объекта. Необходимое расстояние рассчитывали отношением площади к периметру каждой геосистемы. Подобная интерполяция подчиняется основным законам энтропии открытых динамических систем, выведенных Колмогоровым [9], а также понятию территориальной границы пространственно распределенных природных объектов, выражающейся в форме полосы (коридора) с разной степенью ширины и размытости [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Карта геосистем ББЗ, разработанная на основе геоинформационного анализа СПП (рис. 2), дает представление о генезисе и природных особенностях территории. Облик заповедника составляют 26 типологических почвенных комбинаций с индивидуальными продуктивными способностями, буферностью и разнообразием. Большая часть

территории заповедника занята депрессиями озеровидными (54.9%), представленными торфяно-болотными почвами верхового типа (Fibric Histosols) в центральной и северной частях заповедника и торфяно-болотными почвами низинного типа (Hemic Histosols). Водоразделы выпуклые и плоские на рыхлых почвообразующих породах занимают 21.1 и 15.5% соответственно. Водоразделы выпуклые располагаются на водно-ледниковых отложениях, окаймляя озеровидные депрессии, и представляют собой сочетание дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных (Stagnic Retisols) и глеевых почв (Gleyic Retisols). Водоразделы плоские, идентифицированные по “пятнистому” рисунку СПП, имеют наименьшую степень увлажнения, приходится на самые возвышенные участки территории и приурочены к камово-моренным и моренно-озерным отложениям с преобладанием дерново-подзолистых (Retisols) и подзолистых почв (Podzols). Большинство депрессий заповедника имеют озеровидную форму из-за геоморфологической приуроченности к озерно-аллювиальным и флювиогляциальным выравненным низинам валдайского возраста и разделяются на неглубокие и глубокие. Исключением является глубокая долинообразная депрессия в центральной части заповедника (2126(тп)), являющаяся ложбиной стока вод с верхового болота в низинные, находящиеся южнее и представленные глубокими озеровидными депрессия-

ми с преобладанием торфяных почв низинного (2226(тн)) и переходного типов (2226(тн + тп)). Пойменные расчлененные геосистемы сформированы в долине Березины, занимая 5.9% территории, и представлены аллювиальными дерновыми (Gleyic Fluvisols) и аллювиально-болотными (Histic Fluvisols) почвами. Водоразделы фрагментарные и депрессии долинообразные занимают <1.0% заповедника. Отдельно стоит отметить наличие переходных зон (3.9%), представленных сочетаниями водоразделов и депрессий с наиболее сложной (неоднородной) СПП.

В табл. 1 приведены рассчитанные показатели СПП для каждой почвенной комбинации (геосистемы) ББЗ. Площадная интерполяция и последующее обратное агрегирование проведены только для коэффициента неоднородности (КН) – комплексного параметра неоднородности СПП по показателям его сложности и контрастности. На территории ББЗ неоднородность обусловлена в большей степени коэффициентом контрастности, значения которого, в соответствии с [14, 22], характеризуют ПК следующим образом: неконтрастные (<1.0), слабо- (1.0–3.0), средне- (3.1–5.0), сильно- (5.1–7.0) и крайне контрастные (>7.1). Средние значения КН для группы водоразделов выпуклых находятся в диапазоне от 0.49 до 0.99. Данная группа геосистем является второй по пространственности в заповеднике (79 шт.), занимая относительно малые участки (средняя площадь от 120 до 350 га) между верховыми болотами заповедника. Минимальное значение КН (0.09) в одной из геосистем этой группы (1211) обусловлено минимальным коэффициентом контрастности вследствие однокомпонентного состава ее почвенной комбинации. Водоразделы плоские менее неоднородны как в частности – максимальные значения не превышают 1.15, так и в общем – коэффициент неоднородности изменяется от 0.41 до 0.68. Депрессии неглубокие ББЗ представлены 18 вариантами, более неоднородными (КН 0.57–0.74) по сравнению с глубокими, что объясняется более контрастными условиями почвообразования (КК в табл. 1). Депрессии глубокие являются наиболее распространенной геосистемой (80 контуров) и занимают 41 479 га, что явилось основным фактором создания ББЗ почти столетие назад. Из них выделяются депрессии с преобладанием торфяно-болотных почв верхового типа (2226(тв)), средняя площадь которых составляет 1240 га, а максимальная достигает 6721 га. Большая площадь и гомогенность СПП определяют их однородность – разброс средних агрегированных значений КН не превышает 0.08 и находится в интервале от 0.33 до 0.41. Наиболее гомогенная (КН 0.04) депрессия озеровидная глубокая с преобладанием торфяно-болотных почв переходного типа (2226(тп)) состоит из одного элементарного почвенного ареала и занимает всего 23 га. Основная

часть этих геосистем более гетерогенна (диапазон расчетного КН 0.28–0.48) за счет участия в СПП переувлажненных участков водораздельной группы геосистем. Пойменная группа геосистем представлена расчлененными центральными и притеррасными поймами среднего и низкого орографического уровня и является среднееднородной (КН 0.41–0.78). Две поймы притеррасные расчлененные оторфованные среднего уровня (32329) резко выбиваются из общего ряда данных (КН 0.10 и 4.32): первая в связи с однокомпонентным составом почвенной комбинации, вторая – с искусственно проведенной границей ББЗ, разделившей геосистему в северной части по правому берегу р. Березина. Остальные данные соответствуют нормальному распределению Гаусса как для отдельно взятого типа геосистемы, так и для всей группы пойменных систем.

Следует отметить присутствие в ББЗ трех геосистем переходных зон – территорий неявного доминирования водораздельных или депрессионных условий. Сочетание собственно почвенных комбинаций как компонентов таких геосистем обуславливает максимальную контрастность СПП и повышенные значения КН – до 2.85 в границах сочетания водоразделов плоских низких заторфованных и выпуклых низких на рыхлых почвообразующих породах (1326(тп) + 1221).

Распределение количества геосистем ББЗ и КН их СПП дает представление как облика всей территории заповедника, так и естественного уровня неоднородности его частей, незначимо подверженных антропогенным изменениям. Имеет место выраженная неоднородность и локальная выраженность геосистем переходных зон, умеренная неоднородность и встречаемость депрессий неглубоких и пойм центральных и притеррасных, умеренная неоднородность и доминирование водоразделов выпуклых и депрессий глубоких.

Пространственная дифференциация расчетных и агрегированных значений КН демонстрируется на рис. 3. Описание метода пространственного учета КН рассмотрим на примере наибольшей в ББЗ геосистемы – депрессии с преобладанием торфяно-болотных почв верхового типа (2226(тв)) в центральной части заповедника. Соседствуя с более неоднородными водоразделами низкими выпуклыми на рыхлых почвообразующих породах (1221, КН 1.62–3.19), нелогично сохранение минимального КН на всей ее площади (рис. 3а). Картина внутреннего изменения КН отражена на рис. 3б, где центральная часть находится в диапазоне до 0.09, а периферия – от 0.41 до 0.81. Аналогичным образом, используя указанный в методике обратный буфер, интерполировано и агрегировано значение КН в каждой геосистеме (рис. 3с).

Таблица 3. Корреляция индексов педо- и биоразнообразия на территории Березинского биосферного заповедника

Параметр		Биоразнообразия									
		D2	SHDI	SHEI	HB	G	DMg	DMn	D1	d	ild
Педоразнообразия	D2	0.19	0.08	0.03	0.18	0.08	0.06	-0.08	-0.28	0.04	0.05
	SHDI	-0.24	0.68	0.49	0.54	0.57	0.56	-0.32	-0.01	-0.48	0.61
	SHEI	-0.24	0.59	0.51	0.33	0.51	0.39	0.29	0.07	-0.37	0.48
	HB	-0.12	0.49	0.11	0.86	0.37	0.69	0.15	-0.25	-0.49	0.59
	G	-0.23	0.62	0.46	0.49	0.54	0.50	0.30	-0.01	-0.44	0.53
	DMg	-0.24	0.36	0.07	0.60	0.27	0.57	0.27	-0.02	-0.48	0.43
	DMn	-0.23	0.17	0.06	0.16	0.15	0.28	0.31	0.14	-0.30	0.13
	D1	-0.14	-0.22	-0.08	-0.40	-0.19	-0.24	0.03	0.32	0.10	-0.21
	d	0.22	-0.25	-0.10	-0.29	-0.20	-0.32	-0.23	-0.08	0.33	-0.25
	ild	-0.22	0.58	0.30	0.66	0.44	0.62	0.24	-0.06	-0.49	0.65

Сравнительно-географический анализ локализации геосистем ББЗ указывает на мозаичность территории: отсутствуют явно выраженные участки с преобладанием однородных или неоднородных почвенных комбинаций – они чередуются, сменяя друг друга и подчеркивая палеогеографические особенности природных условий, как факторов почвообразования. Сформированная московским оледенением конечно-моренная гряда, протянувшаяся с северо-востока на юго-запад, является самым старшим образованием на территории заповедника и в настоящее время представлена водоразделами выпуклыми и плоскими высокими (1211 и 1311) с однородным почвенным покровом (КН 0.46–0.49). Воздействие морозного выветривания, солифлюкционные процессы, активная деятельность талых ледниковых вод привели к формированию более неоднородной СПП по краям моренной гряды (КН 0.64–0.99), представленной водоразделами выпуклыми низкими на почвообразующих породах с низким удельным весом физической глины (1221 и 1221(2)). Формирование и дифференциация поймы р. Березина в голоцене к западу от моренной гряды ББЗ привели к образованию самой неоднородной части речной долины на территории заповедника, при средних значениях КН пойменных геосистем на остальном протяжении реки к югу в диапазоне 0.19–0.66. Торфообразование в обширных приледниковых озерных котловинах, начиная с периода голоцена, привело к формированию однородных (КН 0.33–0.41) депрессий (2226 (тв, тп, тн)) грунтового и атмосферного питания.

Расчет используемых в научных изысканиях индексов разнообразия в сочетании с показателями СПП и парная корреляция индексов педо- и биоразнообразия приведены в табл. 2–3. В границах каждой из 262 геосистем статистически учтены границы почвенных разновидностей и геоботанических таксационных выделов, уровень значимой

корреляции составил 0.11. Корреляционная матрица всех коэффициентов и индексов указывает на наличие связи (положительной или отрицательной) между большинством показателей, рассчитанным для растительности. Исключение составляют индекс Маргалефа (DMg) и Бриллюэна (HB). В блоке педоразнообразия, несмотря на большой разброс значений, наблюдается три сильных корреляционных связи по индексам Шеннона (SHDI), Нормированного Шеннона (SHEI) и Джини–Симпсона (G). Следует отметить, что эти коэффициенты имеют тесные, хоть и меньшие, связи в оценке биоразнообразия. Оценка парной корреляции между самими индексами разнообразия позволяет выбрать наиболее репрезентативные из них (полужирный шрифт в табл. 3) для построения регрессионных зависимостей почвенного покрова с растительностью (рис. 4). Наиболее тесная связь наблюдаются для 6 из 10 индексов: доминирования Бриллюэна (HB), богатства (DMg) разнообразия (SHDI, SHEI, G) и латеральный дифференциации (ild).

Для подтверждения достоверности аналогичный анализ выполнен для трех групп геосистем: водоразделов (126 геосистем), депрессий (104 геосистемы) и пойм (32 геосистемы), объединенных в соответствии с их номенклатурой [12]. Для водоразделов и депрессий корреляция HB составила 0.87 и 0.86 соответственно, у пойм – 0.79. Результаты расчета индекса ild также сопоставимы с общей выборкой (0.65) у всех трех групп – 0.63, 0.64 и 0.52. Корреляция по индексу Маргалефа сопоставима у водоразделов и депрессий (0.49 и 0.55), резко возрастает в пойменных геосистемах (0.79). Остальные три индекса имеют аналогичные сходства для геосистем водоразделов и депрессий – SHDI 0.66 и 0.65, SHEI 0.51 и 0.55 и G 0.52 и 0.56, но при этом значимо отличаются для группы пойм, где корреляция индексов составляет 0.06, -0.42 и -0.09 соответственно. Такое существенное уменьшение обусловлено в первую

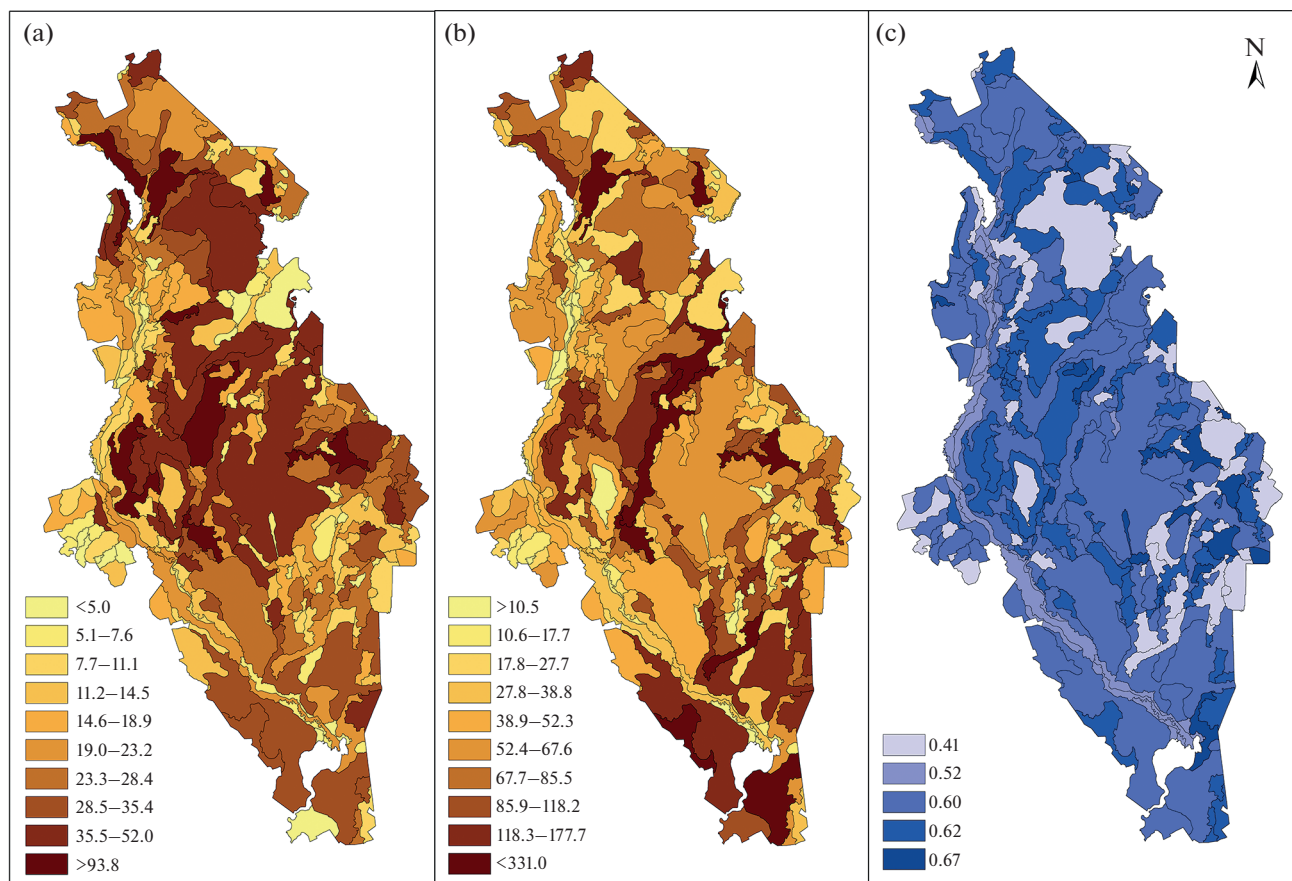


Рис. 5. Индекс латеральной дифференциации (ild): а – почвенного покрова, б – растительности, с – коэффициент корреляции.

очередь малой общей выборкой (32 контура) и отсутствием полной информации о растительных ассоциациях пойменных территорий, то есть условиями оценки корреляции, а не природными особенностями территории ББЗ.

В целом, наиболее информативной оказалась группа индексов разнообразия (SHDI, SHEI, G) и латеральной дифференциации (ild). Взаимосвязь видового богатства лучше описывается индексом DMg, при этом практически функциональную зависимость имеет индекс НВ, характеризующий доминирование в геосистемах какой-либо почвенной разновидности или растительной ассоциации. На рис. 4 представлены регрессионные зависимости для наиболее коррелируемых индексов. Для НВ, DMg и SNDI лучшим вариантом явилась линейная функция, а для ild – степенная. Коэффициент детерминации (R^2) максимален для индекса НВ и позволяет оценивать 73.6% педоразнообразия через биоразнообразие, и наоборот (рис. 4). Аналогично, на уровне более 50.0% связаны значения разнообразия для индекса латеральной дифференциации ild. Коэффициенты детерминации индексов SHDI и DMg ниже – 0.33 и 0.46, соответственно. Тем не менее, индекс ild в

сравнении с индексом НВ более тесно коррелирует с КН геосистем, поэтому он был выбран для отражения пространственной дифференциации педо- и биоразнообразия (рис. 5а, 5б), а также корреляции между ними в зависимости от типологических групп геосистем (рис. 5с). Корреляция на уровне 0.62 и 0.60 наблюдается в границах водоразделов фрагментарных и выпуклых, депрессий глубоких (82 и 85 контуров, соответственно), 0.67 – на территории депрессий неглубоких (19), 0.41 – на водоразделах плоских (44) и 0.52 в границах пойм ББЗ (32 контура).

Таким образом обнаружено, что на всей территории ББЗ прослеживается умеренно сильная прямая корреляционная связь педо- и биоразнообразия с максимальным выражением (>0.60) на площади 66277 га (78.5%), как правило, в геосистемах с наибольшими значениями разнообразия, что обуславливает актуальность применения индекса ild в природоохранных целях. Чуть ниже среднего (<0.50), что объясняется меньшей неоднородностью СПП, коррелирует латеральная дифференциация почвенного и растительного покрова на территории водоразделов плоских 13098 га (15.5%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структура почвенного покрова Березинского биосферного заповедника может служить эталоном для исследований корреляционных связей педо- и биоразнообразия. Достоверность корреляционно-регрессионного анализа данных определяется пространственной точностью почвенной и геоботанической информации, сочетаемой в границах почвенных комбинаций.

Представленный метод анализа, основанный на синтезе системного подхода к СПП и геостатистического анализа в программной среде ГИС, позволил не только сформировать точное представление о генетическом облике территории ББЗ, но и провести типологический учет показателей неоднородности почвенного и растительного покрова, пространственно оценить педо- и биоразнообразие с установлением взаимной корреляции в границах четырехуровневых геосистем.

Неотъемлемым этапом геостатистического анализа СПП является пространственный учет “ядер” геосистем в связи с дискретно-континуальным характером СПП, как “каркаса” открытых природных систем и изменением меры хаотичности Колмогорова от их центра к периферии. Подобная интерполяция необходима для всех картометрических показателей неоднородности СПП и должна предварять пространственную оценку педоразнообразия.

Картометрический анализ неоднородности СПП служит дополнительным критерием выбора показательных индексов педо- и биоразнообразия – в ряду коррелирующих индексов доминирования Бриллюэна (НВ), богатства Маргалефа (DMg), разнообразия (SHDI, SHEI, G) и латеральной дифференциации (ild) наиболее геостатистически достоверную меру педоразнообразия отражают индексы SHDI, SHEI, G, ild. Распределенные в границах геосистем ББЗ значения данных индексов отражают разнообразие природных условий, предопределяя уровень допустимой антропогенной нагрузки для обоснования функционального зонирования и управления особо охраняемыми природными территориями.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева В.Л., Ковалевская О.М., Воронович И.В. Разнообразие экотонов Березинского биосферного заповедника // Вести БГПУ. 2010. № 3. С. 63–69.
2. Андреева В.Л. Особенности типов земель национального парка “Браславские озера” // Вестник БГУ. Сер. 2. Химия, биология, география. 2005. № 1. С. 91–94.
3. Анимича Е.Г., Шарыгин М.Д. Феномен территориальной границы // Географический вестник. 2007. № 1/2. С. 5–10.
4. Арманд А.Д. Механизмы устойчивости геосистем. М.: Наука, 1992. 208 с.
5. Волобуев В.Р. Почвенные общности и зональная структура почвенного покрова // Почвенные комбинации и их генезис. М.: Наука, 1972. С. 32–39.
6. Герасимова М.И., Головлева Ю.А., Лаврова А.М., Красильников П.В. Количественная оценка почвенного разнообразия при разных масштабах исследования на примере Республики Карелии // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2020. № 3. С. 47–52.
7. Годельман Я.М. Структура почвенного покрова и землеустроительное проектирование // Почвоведение. 1977. № 9. С. 13–25.
8. Клебанович Н.В., Киндеев А.Л., Сазонов А.А., Червань А.Н., Домась А.С., Ереско М.А., Ефимова И.А. Пространственная неоднородность почвенного покрова и агрохимических показателей Солигорского района // Земля Беларуси. 2019. № 1. 48 с.
9. Колмогоров А.Н. Теория передачи информации // Сессия Академии наук СССР по научным проблемам автоматизации производства. 15–20 октября 1956 г. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 66–99.
10. Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С. Почвенное разнообразие и его значение в контексте современной географии почв // Почвоведение. 2018. № 1. С. 3–16. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010014>
11. Романова Т.А. Опыт количественной оценки биоразнообразия лесов Беловежской пуши // Природные ресурсы. 1997. № 3. С. 33–47.
12. Романова Т.А., Червань А.Н., Андреева В.Л. Теоретические основы и практическая значимость исследований структуры почвенного покрова // Почвоведение. 2011. № 3. С. 300–310.
13. Сазонов А.А., Рудаковский И.А., Пенкрат И.В. Структура почвенного покрова национального Парка “Нарочанский” // Территория науки. 2018. С. 12–18.
14. Скрябина О.А. Структура почвенного покрова, методы ее изучения. Пермь, 2007. 206 с.
15. Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. Количественная оценка разнообразия почв Арктики и Субарктики России (по картографическим данным) // Почвоведение. 2019. № 1. С. 20–31. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010143>
16. Сталбов Р.Я., Качков Ю.П., Яцухно В.М. Характеристика структуры почвенного покрова эродированных земель районов Валдайского оледенения // Почвоведение. 1979. № 9. С. 42–52.
17. Технический кодекс установившейся практики. ТКП 651–2020 (33520). Почвенное обследование земель и создание, обновление почвенных карт. Порядок и технология работ. Утвержден и введен в действие приказом Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь от 9 января 2020 г. № 2. Минск. 72 с.
18. Флоринский И.В. Гипотеза Докучаева – центральная идея цифрового прогнозирования почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Цифровая почвенная картография: теоретические

- и экспериментальные исследования. М., 2012. С. 19–25.
19. Фридланд В.М. Структуры почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 235 с.
 20. Червань А.Н., Романова Т.А., Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А. Геосистемный подход к организации природопользования в переувлажненных агроландшафтах (на примере СПК “Ловжанский” Витебской области Беларуси) // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Естественные науки. 2016. № 25. Вып. 37. С. 143–155.
 21. Червань А.Н. Типизация структуры почвенного покрова средствами ГИС для оценки производительного потенциала агроландшафтов (на примере Республики Беларусь) // Вестник Удмуртского ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31. Вып. 3. С. 280–289.
<https://doi.org/10.35634/2412-9518-2021-31-3-280-289>
 22. Юодис Ю.К. Опыт характеристики структуры почвенного покрова Литовской ССР // Почвенные комбинации и их генезис. М.: Наука, 1972. С. 150–157.
 23. Fajardo M., McBratney A.B. Pedodiversity // Pedometric. Australia: The University of Sydney, 2018. P. 491–518.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5_16
 24. Ibáñez J.J., Brevik E.C., Cerdà A. Geodiversity and geoheritage: Detecting scientific and geographic biases and gaps through a bibliometric study // Sci. Total Environ. 2019. V. 659. P. 1032–1044.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.443>
 25. Ibáñez J.J., Bockheim J. Pedodiversity. London: CRC press, 2013. 250 p.
 26. Ibáñez J.J., Krasilnikov P.V., Saldaña A. Archive and refugia of soil organisms: applying a pedodiversity framework for the conservation of biological and non-biological heritages // J. Appl. Ecol. 2012. V. 49. № 6. P. 1267–1277.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02213.x>
 27. McBratney A.B. On variation, uncertainty and informatics in environmental soil management // Soil Res. 1992. V. 30. № 6. P. 913–935.
<https://doi.org/10.1071/SR9920913>
 28. Minasny B., McBratney A.B. Methodologies for global soil mapping // Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation. Springer, 2010. V. 2. P. 429–436.
https://doi.org/10.1007/978-90-481-8863-5_34
 29. Saldana A., Ibáñez J.J., Zinck J.A. Soilscape analysis at different scales using pattern indices in the Jarama-Henares interfluvium and Henares River valley, Central Spain // Geomorphology. 2011. V. 135. № 3–4. P. 284–294.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.016>
 30. Saldana A. Pedodiversity and landscape ecology, pedodiversity. Boca-Raton: CRC Press, 2013. P. 105–132.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00137-X)
 31. Samec P., Volánek J., Kučera M., Cudlín P. Effect of soil diversity on forest plant species abundance: a case study from Central-European highlands // Forests. 2021. V. 12. № 5. P. 534–549.
<https://doi.org/10.3390/f12050534>
 32. Wadoux A.M., Heuvelink G.B., Lark R.M., Lagacherie P., Bouma J., Mulder V.L., Libohova Z., Yang L., McBratney A.B. Ten challenges for the future of pedometrics // Geoderma. 2021. V. 401. P. 115–155.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115155>

Soil Cover Structure, Pedo- and Biodiversity of Berezinsky Biosphere Reserve

A. N. Chervan¹, *, A. L. Kindeev¹, **, and A. A. Sazonov¹

¹Belarusian State University, Nezavisimosti av., 4, Minsk, 220108 Belarus

*e-mail: ChervanAlex@mail.ru

**e-mail: AKindeev@tut.by

The geosystem typology of soil cover structure of the Berezinsky Biosphere Reserve was carried out, and a quantitative assessment of the indicators of contrast, complexity, and heterogeneity of soil combinations was carried out. The surface differentiation of the calculated and aggregated coefficients of heterogeneity of the soil cover structure is given. A typological characteristic of natural conditions of the territory of the reserve is given according to the identified regularly organized geosystems: fragmentary, convex and flat watersheds; valley-like and lake-like depressions; dissected riverbed, central and near-terraced floodplains. There are a pronounced heterogeneity and local manifestation of the geosystems of transitional zones, moderate heterogeneity and the quantity of shallow depressions and floodplains of the central and near-terraced, moderate heterogeneity and the dominance of convex watersheds and deep depressions. Geostatistical processing of cartometric indicators of soil cover structure and 10 indices of soil and vegetation diversity was carried out in the geoinformation database in compliance with topological rules, as well as the calculation of pair correlations when assessing the pedo- and biodiversity of the reserve territory. It is shown that the Shannon, normalized Shannon, Gini-Simpson and lateral differentiation indices are the most statistically justified. The reliability of the correlation between pedo- and biodiversity is confirmed by calculations of index values for groups of identified geosystems. A regression analysis of the most correlated indices was performed with the calculation of functional dependencies. The spatial distribution of the results of the assessment of pedo- and biodiversity is given, taking into account the coefficients of determination between them, which can be used as the basis for functional zoning and territorial planning of the allowable anthropogenic capacity in management of specially protected natural areas.

Keywords: geosystem, heterogeneity, diversity indexes, geostatistics