

ISSN 0869-6071

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО



ИЗВЕСТИЯ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

Специальный выпуск
СОВРЕМЕННЫЕ
ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В БАЙКАЛЬСКОЙ АЗИИ
Часть 2

Том 156, номер 3
июль – сентябрь
2024



НАУКА
— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 156, номер 3, 2024

Оценка экосистемы озера гусиное на основе анализа макрофитов
(Республика Бурятия)

Б. Б. Базарова 181

Изучение геосистем центральной части Баргузинского хребта
(Прибайкалье)

И. Н. Биличенко 194

Ассимиляция углерода лесами как экосистемная услуга: количественная
оценка на примере забайкалья и национального парка «Чикой»

В. С. Брезгин, Г. М. Агафонов 205

Дискретный анализ пространственно-временной изменчивости
геосистем Байкальской Сибири

А. К. Черкашин, А. А. Фролов 213

CONTENT

Volume 156, No. 3, 2024

Assessment of lake Gusinoe ecosystem based on macrophyte analysis (Republic of Buryatia)	
<i>B. B. Bazarova</i>	181
Study of the geosystems of the central part of the Barguzinskii Range (Gisbaikalia)	
<i>I. N. Bilichenko.</i>	194
Carbon assimilation by forests as an ecosystem service: quantitative assessment on the example of the Trans-Baikal territory and the Chikoy national park	
<i>V. S. Brezgin, G. M. Agafonov</i>	205
Discrete analysis of spatial and temporal variability of geosystems of Baikal Siberia	
<i>A. K. Cherkashin, A. A. Frolov</i>	213

УДК 574.589 (571.54)

ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА ГУСИНОЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МАКРОФИТОВ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

Б. Б. Базарова

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

E-mail: balgit@mail.ru

Озеро Гусиное — крупнейшее озеро на Байкальской природной территории после оз. Байкал, вокруг которого сформирован Гусноозерский промышленный комплекс. Во флоре макрофитов оз. Гусиное выявлено 27 видов, из 21 семейства. Пространственная структура растительности обусловлена морфометрическими характеристиками литорали озера. Наиболее заросшими являются северный и южный сектора озера. По сравнению с предыдущими годами исследования выявлен рост площади зарослей харовых водорослей и мхов. Прогрессирующее зарастание озера способствует поддержанию процессов самоочищения экосистемы, выводу из оборота загрязняющих и биогенных элементов и обеспечивает устойчивое развитие экосистемы. О способности экосистемы озера сохранять общий уровень продуктивности за счет перестройки структуры свидетельствуют и данные по другим сообществам гидробионтов (зоопланктону, зообентосу и ихтиоценозам). Результаты наших исследований химического состава макрофитов оз. Гусиное, показали, что по сравнению с данными 90-х годов, значения концентрации химических элементов в макрофитах уменьшились. Зафиксированное экологическое состояние озера обусловлено комплексом факторов как природного, так и антропогенного характера (уровень воды, повышение температуры, морфометрия литорали, химический состав воды).

Ключевые слова: макрофиты, оз. Гусиное, *E. canadensis*, химические элементы, загрязнение, экосистема

DOI: 10.31857/S0869607124030014, **EDN:** LLYAYR

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Гусиное — крупнейшее озеро на Байкальской природной территории после оз. Байкал. В окрестностях оз. Гусиное и г. Гусиноозерска сформировался Гусиноозерский промышленный комплекс, являющийся одним из крупнейших в Республике Бурятия. Он включает энергопроизводящие, перерабатывающие и транспортные предприятия. Наиболее масштабными загрязнителями озера являются Гусиноозерская ГРЭС, нерекультивированные терриконы вскрышных пород Холбоьджинского угольного разреза. Озеро является основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения; служит приемником очищенных хозяйственно-бытовых сточных вод станции биологической очистки г. Гусиноозерск и сточных вод без биологической очистки пос. Гусиное Озеро [15].

Пуск первого энергоблока Гусиноозерской ГРЭС был осуществлен в декабре 1976 г. С 2014 г. станция вышла на уровень мощности в 1100 МВт. В качестве топлива для ГРЭС используются бурые угли Хольбольтжинского угольного разреза. В настоящее время отмечается превышение ПДК по сульфатам, хлоридам, натрию, железу, аммонии, марганцу, свинцу. В районе золоотвала и полигона промышленных отходов наблюдается превышение допустимых концентраций железа до 14 ПДК (14.03 мг/л) и марганца до 1.75 ПДК (0.175 мг/л). На территории г. Гусиноозерска ареал загрязнения картируется на площади около 1380 км². В поверхностных водах обнаружены стойкие органические загрязнители (полихлорированные бифенилы, хлорорганические пестициды, полициклические ароматические углеводороды) в количестве 5.54–58.26 нг/л и наблюдается их аккумуляция гидробионтами [5, 21, 22]. В течение 2010–2014 годов удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ) изменялся от 2.06 до 3.14, что соответствует 3 «а» классу качества воды, т. е. вода озера, является устойчиво загрязненной [5]. Поскольку озеро Гусиное связано с р. Селенгой основным притоком Байкала, существует потенциальная угроза того, что оно может стать самым большим источником загрязнения бассейна Байкал.

Озеро является ценным рыбохозяйственным водоемом, давно вызывающим интерес краеведов, геологов и других исследователей. Существуют документы, описывающие особенности образования и этапы формирования озера. Исторический обзор публикаций по оз. Гусиное и результаты НИР, проведенных в 1947 г. Биолого-географическим факультетом Иркутского государственного института им. А. А. Жданова, приведены М. М. Кожовым [9]. Экологические последствия использования оз. Гусиное в качестве водоема-охладителя исследованы в основном в начальный период ввода в эксплуатацию энергоблоков первой очереди (1981–1991 гг.). Результаты гидрологических, гидрохимических, гидробиологических и ихтио-паразитологических исследований этого периода частично обобщены в монографии «Экология озера Гусиное» [7]. В последующие годы эпизодически проводятся работы отраслевыми рыбохозяйственными научно-исследовательскими учреждениями (Востсибрыбниипроект, Востсибрыбцентр и Байкальское отделение Госрыбцентра) для определения общего допустимого улова рыб (ОДУ).

В начале XXI в. возрос интерес к озеру в связи с ростом как техногенных факторов, так и с появлением новой угрозы в виде биологических инвазий, как преднамеренно вселенных человеком, так и случайно проникших и натурализовавшихся чужеродных видов гидробионтов. В настоящее время в озере зарегистрированы 7 инвазивных видов рыб, 2 вида амфипод и 1 водное растение: *Elodea canadensis* Mich. В 2013 г. благодаря инициативе д.б.н., проф. Н. М. Пронина был начат новый цикл исследований на оз. Гусиное. Появились работы, рассматривающие абиотические параметры среды [22, 17] и биоту. В биоте озера наиболее изученными являются вопросы экологии сообществ зоопланктона [20], зообентоса [14; 10], популяций рыб [3, 11], их паразитофауна [7, 8] и бактериопланктон [33]. Практически неизученным остается растительный блок. Информация о водных макрофитах имеется только по состоянию на 1927 г. [6] и 1947 г. [9]. По состоянию на 1990–1991 гг. приведены сведения о химическом составе *Potamogeton praelongus* Wulf [23]. В связи с выше сказанным, цель данной работы — оценка состояния экосистемы оз. Гусиное на основе анализа динамики макрофитов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Озеро Гусиное имеет овальную форму, вытянутую с юго-запада на северо-восток (рис. 1). Площадь водосборного бассейна озера равна 924 км², площадь водного зеркала составляет 164 км², средний многолетний объем воды – 2,4 км³, при средней глубине 15 м. Длина – 24,8 км, средняя ширина – 8 км, наименьшая – 5,1 м, преобладающая глубина – 15–20 м, а наибольшая – 26 м. Чаша озера имеет корытообразную форму с двумя неравновеликими котловинами. Основная часть мелководья озера приходится на северное и юго-западное побережья озера [4, 9].

Озеро Гусиное относится к слабопроточным водоемам. Коэффициент условного водообмена равен 0,0125. В озеро впадает 9 рек, при высоком уровне воды вытекает р. Баин-Гол в юго-восточной части озера. Береговая линия имеет плавные очертания, изредка усложняясь песчаными косами и конусами выноса устьев рек и несколькими неглубокими заливами. С северо-запада в озеро вдается широкий мыс Чана, который сужает озеро и разделяет его на 2 котловины:

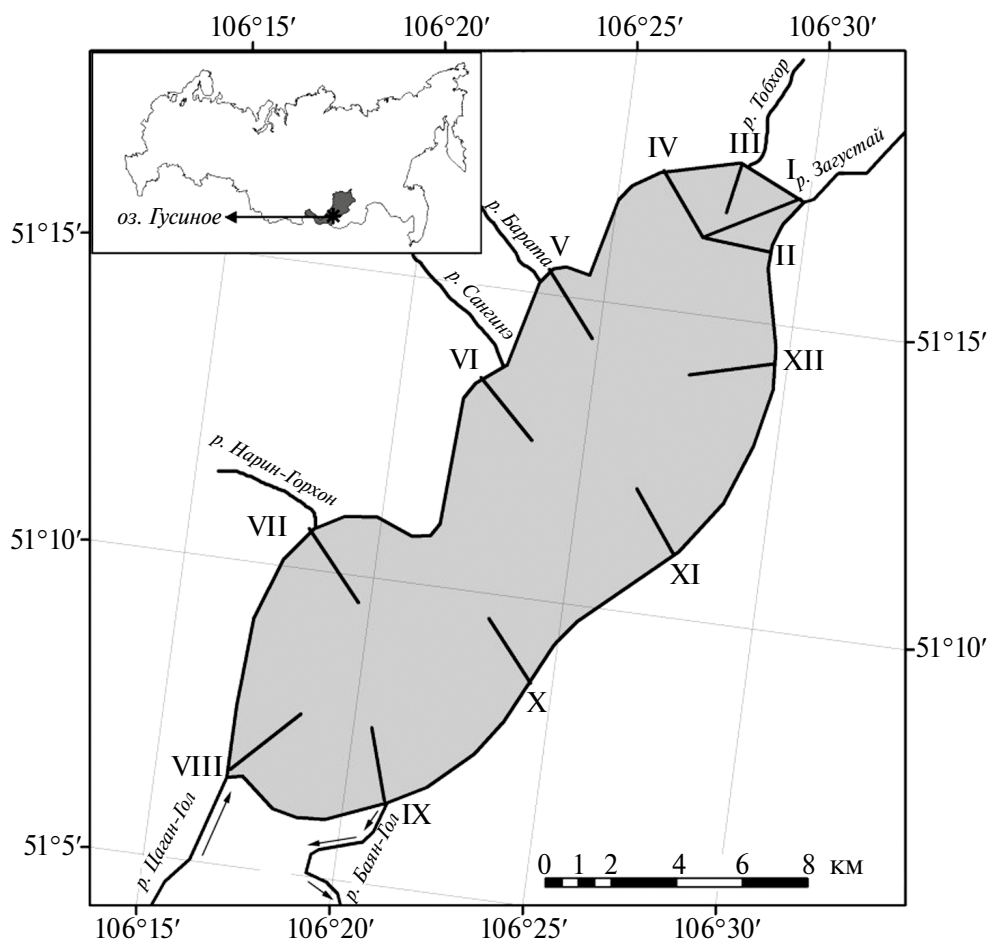


Рис. 1. Картограмма оз. Гусино: I–XII – гидроботанические профили.

южную (меньшую по площади, но более глубокую) и северную, занимающую основную часть озера. Грунты в озере не отличаются большим разнообразием. Прибрежная часть занята песчаными и песчано-галечными грунтами. Вся глубинная, а также прибрежная полоса вдоль западного берега покрыты вязкими илами черного, изредка серого цвета [10, 23].

Гидробиотические работы на оз. Гусиное проведены в июле 2013–2014 гг. с использованием общепринятых методов. При изучении растительности заложено 12 профилей (Рис. 1), от уреза воды до максимальной глубины роста растений. При классификации растительности использован доминантный подход выделения сообществ. Отбор фитомассы растений проведен прибором Количественного учета гаммарид (КУГ) с площадью захвата 0.25 м². Всего описано 89 станций.

Определено содержание тяжелых металлов в химический состав четырех видов: *Lemna trisulca* L., *Elodea canadensis* Mich., *Potamogeton perfoliatus* L. (листья, стебли), *Myriophyllum* ssp. (листья, стебли, корни). Анализ проведен в Хабаровском инновационно-аналитическом центре Института тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина с использованием прибора ICP-MS Elan DRC II PerkinElmer (США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Флора и растительность озера. Во флоре озера зарегистрировано 27 видов из 21 семейства. По сравнению с предыдущими исследованиями не отмечена *Nuphar* sp.

Макрофиты занимают литораль до глубины 13.0 м в юго-западном секторе озера. В остальной части озера растения встречаются до глубин 8.5–11.0 м. Площадь зарастания составляет 50.7 % от общей площади озера [2]. В озере доминируют 10 формаций: *Phragmiteta australis*, *Persicarieta amphibia*, *Nymphoides peltatae*, *Chareta fragilis*, *Chareta globularis*, *Nitellata*, *Fontinalis antipyretica*, *Potamogetoneta perfoliatus*, *Potamogetoneta praelongus*, *Potamogetoneta crispus*, *Stuckenieta pectinata*.

Пространственная структура растительности озера во многом обусловлена морфометрическими особенностями его литорали. Литораль северного и южного секторов озера (профили I, III и VIII), характеризуется протяженным и пологим дном, грунт ил. В данных секторах макрофиты формируют плотные заросли, характеризующиеся следующей последовательностью распределения сообществ по мере роста глубины: *Phragmiteta australis* (до глубин 0.5 м) → *Polygoneta amphibii* ↔ *Nymphoides peltatae* (глубины 0.5–1.0 м) → *Potamogetoneta perfoliati* ↔ *Potamogetoneta crispus* ↔ *Myriophylleta sibirici* ↔ *Stuckenieta pectinati* (глубины 0.5–3.5 м) → Charophyta ↔ Bryophyta (3.5–10.0 м). В литорали северо-западного и западного секторов (профили IV, V) озера до глубины 1.0 м грунт песок, на глубинах более 1.0 м – ил. Растительность характеризуется следующей последовательностью: *Potamogetoneta perfoliati* ↔ *Stuckenieta pectinati* ↔ *Elodea canadensis* (от уреза до 1.5 м) → *Fontinalis antipyreticae* ↔ *Nitellata opaca* ↔ Charophyta (с глубины 1.5–2.0 до 8.5 м). Литораль восточного (профили II, IX, X, XI, XII) и юго-западного (профили VI, VII) секторов озера характеризуется резким уклоном дна, грунт песок. В этих секторах озерах растут только харовые водоросли и мхи.

Содержание химических элементов в водных макрофитах оз. Гусиное. Результаты анализа химического состава макрофитов оз. Гусиное представлены в таблице 1.

Табл. 1. Содержание химических элементов (мг/кг) в водных растениях оз. Гусиное

	2013 г. Наши данные				90-е годы [23]	
	<i>E. canadensis</i>	<i>L. trisulca</i>	<i>M. sibiricum</i>	<i>P. perfoliatus</i>	<i>P. praelongus</i> повт. 1	<i>P. praelongus</i> повт. 2
Ca	10336.49	31323.74	17681.28	9124.21	70000	30000
Na	10021.50	3550.12	9993.46	2676.87	35000	9 000
Mg	3581.78	5340.44	3655.24	3971.69	4200	7500
Fe	670.77	1106.17	431.33	1052.09	14000	7500
Sr	697.89	924.03	657.87	198.3	700	900
Al	190.85	449.69	133.44	467.43	21000	—
Ti	9.33	28.51	9.98	18.69	210	285
Cr	—	—	0.72	0.28	21	12
Co	0.58	1.76	0.31	2.36	14	6.8
Ni	0.06	6.98	0.09	2.72	14	6.8
Cu	1.29	10.54	3.38	2.27	21	37.5
Zn	97.56	114.60	55.05	19.59	140	225
Mo	0.87	2.,91	3.54	1.27	3.5	1.9
Ba	48.20	130,13	56.06	53.99	2100	600
Pb	0.42	1,48	2.76	0.77	21	7.5
P	8418.69	1836.57	1075.40	2392.31	3500	7500
Sn	—	—	0.37	0.08	3.5	2.25
Mn	1884.60	4606.56	352.50	1305.34	210	285
As	2.02	3.63	2.14	1.88	—	—
Se	—	0.02	0.01	0.05	—	—
Cd	0.08	0.28	0.06	0.16	—	—
Sb	0.03	0.59	0.07	0.03	—	—
W	0.33	1.59	0.62	0.18	—	—
Hg	0.01	0.05	0.02	0.01	—	—
Bi	—	—	—	0.14	—	—
K	35285.65	22091.40	12891.45	17372.1	—	—
B	33.60	1587.99	59.14	31.65	—	—
V	0.83	4.02	3.42	1.55	—	—

Примечание: «—» — нет данных;

На основе полученных данных построены ряды содержания элементов:

P. praelongus в 1990–1991 гг. Ca > Na > Fe > Al > Mg > Ba > Sr > Mn > Ti > Zn > Cu
> Pb > Cr > Cu > Ni > Sn > Mo

2014 г.

E. canadensis: Ca > Na > K > Mg > Mn > Sr > Al > Fe > Zn > Ba > B > Ti > As > Cu >
Mo > V > Co > Pb > W > Cd > Ni > Sb > Cu > Ni > Sb > Hg

L. trisulca: Ca > K > Mg > Na > Mn > B > Fe > Sr > Al > Ba > Zn > Ti > Cu > Ni > V
> As > Mo > Co > W > Pb > Sb > Cd > Hg > Se

M. sibiricum: Ca > K > Na > Mg > Sr > Fe > Mn > Al > B > Ba > Zn > Ti > Mo > Cu >
V > Pb > As > Cr > Sn > Co > W > Ni > Cd > Hg > Se > Sb

P. perfoliatus: Ca > K > Mg > Na > Mn > Fe > Al > Sr > B > Zn > Ti > Ni > Co > Cu >
As > Mo > Cr > Pb > W > Cd > Bi > Sn > Se > Sb > Hg

Значения концентрации элементов в исследованных видах водных растений можно объединить в 4 группы: элементы с повышенной (Ca, Na, Mg, K, Fe, Sr, Mn и Al), довольно высокой (Ti, Ba, Zn, B), средней (Cu, Cr, Co, Ni, Mo, Pb, As, V), низкой (Se, Cd, Sn, Sb, W, Hg, Bi) концентрацией. При этом в первую группу в основном вошли физиологически необходимые элементы. В настоящее время, по сравнению с данными 90-х годов, значения концентрации химических элементов в макрофитах уменьшились. Возможно, это связано с прекращением сброса сточных вод с Холбольджинского угольного разреза и улучшения экологической ситуации на ГРЭС в середине 80-х годов прошлого столетия [23].

Динамика. Сравнительный анализ современной пространственной структуры растительности озера с литературных данных за 1947 г. [23] показывают:

- уменьшение зарослей *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., ранее он рос вдоль северного и западного берегов. В период наших исследований наиболее плотные заросли расположены на северной оконечности озера, характеризующейся болотистым берегом, и где расположена ГРЭС и идет интенсивная тепловая и биогенная нагрузка.

- на западном побережье озера ранее были хорошо выражены полосы *Potamogeton crispus* L., *Stuckenia pectinata* (L.) Börner, в настоящее время они встречаются небольшими группировками на глубинах до 1,5 м. Ранее *Potamogeton praelongus* L. занимал большие площади и формировал плотные заросли, сейчас сообщества формируются только в литорали напротив ручья Загустайка (профиль III).

- основным и наиболее значимым изменением в растительном покрове озера является массовое развитие харовых водорослей и мхов. По данным предыдущих лет они появлялись с глубины 6,0 м. В настоящее время харовые растут с метровых глубин, иногда покрывая дно сплошным ковром до глубин 8,5–11,0 м. На западном побережье массовое развитие получили сообщества мха *Fontinalis*. В целом наблюдается смещение сообществ харовых и мха на меньшие глубины, при сохранении их на больших глубинах. Фитомасса мхов и харофитов достигает 4 кг/м².

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате наших исследований выявлен рост площади фитомассы харовых водорослей и мхов. Увеличение площади произошло за счёт смещение границ произрастания харофитов. Если в 40-х годах харовые водоросли произрастали с глубины 6,0 м и до 13 м, то в период наших работ – с метровых глубин до 11 м. Согласно «Водной рамочной директиве 2000/60/ЕС» массовое развитие харофитов свидетельствует о «хорошем» состоянии экосистемы в целом [32]. Харофиты, образуя плотный ковер на дне озера, уменьшают взмучивание донных отложений, трансформируя биогенные и загрязняющие вещества, улучшают качество и органолептические показатели воды в водоеме [31]. Увеличение вклада макрофитов в первичную продукцию в целом ведет к росту устойчивости экосистемы водоема и ее способности к самоочищению [19]. О способности харовых водорослей адаптироваться к высоким концентрациям тяжёлых металлов [28] и, наоборот, их низкую устойчивость к повышению содержания биогенных элементов, известно из ряда исследований [27, 28].

Мхи рода *Fontinalis* являются стрессоустойчивой группой, и многие виды имеют широкий трофический диапазон. Водные мхи используются в качестве индикаторов по наличию или отсутствию загрязняющих веществ, служат биомониторами (аккумуляторами) тяжелых металлов. Они являются эталонными видами, и их массовое

развитие свидетельствуют о «хорошем» экологическом статусе водоема [25]. Увеличение концентрации фосфора также негативно влияет на них [24].

Предполагаем, что наблюдаемые изменения связаны со снижением уровня воды озера, в результате природного циклического снижения увлажненности рассматриваемой территории [13] и роста объема скачиваемых вод для технологических нужд ГРЭС.

Возможно, и тепловая нагрузка стала благоприятным фактором для развития харовых водорослей. Согласно [29, 26] интенсивный рост харофитов начинается, когда температура воды достигает 8–10°C. Оптимальными условиями для развития *Fontinalis* является диапазон температуры 5–15°C. При достижении 10°C наблюдается максимальный рост их ризоидов. Длительное воздействие температур более 20°C негативно влияет на мхи [24]. Увеличение объема теплых вод, сбрасываемых электростанцией непосредственно в озеро, привело к изменению его температурного режима. В период до строительства ГРЭС озеро вскрывалось в мае, с мая по июнь устанавливается весенняя гомотермия, с прогревом воды в столбе до 8,5°C. В июле–августе вода прогревается до 15,0–21,5°C. В октябре наблюдалась осенняя гомотермия [4]. В настоящее время разрушение ледового покрова наблюдается в апреле – мае. В северной части водоема, вблизи электростанции, ледовый покров отсутствует весь зимний период. Площадь полыньи изменяется от 0,336 до 157,584 км² [18]. В зимнее время температура воды в сбросном канале и акватории озера различается на 14–16°C, а в летнее на 11–14°C [17]. Распределение температуры в толще воды озера достаточно равномерное: в зоне максимальных глубин различия между значениями поверхностного и придонного слоёв были в пределах 1,9–3,8°C. В мае 2013 г. прозрачность воды по диску Секки составила 7,5 м. Концентрации кислорода в воде (как в поверхностном, так и в придонном слоях) были высокими вплоть до полного насыщения [10]. Рост сульфатов в гидрохимическом составе воды [23], также благоприятно влияют на харофитов.

В целом, анализ макрофитной растительности оз. Гусиное показывает, что в настоящее время, несмотря на значительную антропогенную нагрузку, экосистема озера способна сохранять общий уровень продуктивности за счет перестройки структуры сообществ гидробионтов. О способности экосистемы озера сохранять общий уровень продуктивности за счет перестройки структуры свидетельствуют и данные по другим блокам. Так, общая численность зоопланктона в 2014 г. сравнима с данными за 1990–1991 гг. В то же время наблюдаются изменения в структуре зоопланктона: уменьшение абсолютной и относительной доли численности и биомассы коловраток на фоне увеличивающейся роли ветвистоусых [20]. Уровень развития зоопланктона и зообентоса оз. Гусиное в 2009 г. соответствовал, как и в предыдущие годы, мезотрофному типу озер низшей градации [3]. За более чем полувековой период исследований ихтиофауны оз. Гусиное были отмечены 23 вида рыб из 11 семейств, обитавшие в озере в различные периоды его существования. За более чем пятидесятилетний период из состава ихтиофауны озера исчезли 5 видов: ленок, черный байкальский хариус, сиг, сибирский голец и налим. Вместе с тем в результате рыбоводно-акклиматизационных работ и инвазий состав ихтиофауны пополнился 7 видами: омуль, пелядь, амурский сазан, лещ, верховка, амурский сом и ротан. В современный период наиболее высокой численностью среди чужеродных видов характеризуются лишь сорные непромысловые: ротан и верховка [11]. В целом, о благополучной ситуации в озере свидетельствуют размерные показатели плотвы, соотношение мелких и средних рыб относительно крупных. Показатель роста окуня

в оз. Гусиное был на 11 % выше средних для водоемов Забайкалья значений и находился на уровне предыдущих лет [12]. Увеличение вклада макрофитов в первичную продукцию в целом ведет к росту устойчивости экосистемы водоема и способности к самоочищению [19].

Как известно, максимальные пики загрязнения вод Гусиного озера приходится на период 1975–1985 гг., т. е. на начало эксплуатации ГРЭС и Холбольджинского угольного разреза. После прекращения сброса сточных вод с углеразреза и улучшения экологической ситуации на ГРЭС в середине 80-х годов степень загрязнения вод озера несколько уменьшилась [21, 22]. Результаты наших исследований химического состава макрофитов оз. Гусиное показали, что по сравнению с данными 90-х годов, значения концентрации химических элементов в макрофитах уменьшились. Сравнительный анализ ряда элементов оз. Гусиное с данными из других водоемов показывает их сходство [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемый рост зарастания оз. Гусиное, особенно сообществами харовых водорослей и мхов, свидетельствует, что экосистема развивается по макрофитному типу. Экосистема озера сохраняет свой уровень продуктивности за счет перестройки структуры гидробиоценозов, в том числе макрофитов. Это подтверждается снижением концентрации элементов в растениях. Растения способны аккумулировать загрязняющие вещества, захоранивая их в донных отложениях, перерабатывая, изменяя формы нахождения, связанные ионы металлов опасны в меньшей мере или почти безвредны. На данном этапе развития экосистема озера Гусиное сохраняет способность к самоочищению и саморегуляции. В то же время рост антропогенной нагрузки, уничтожение макрофитов может вызвать дисбаланс в системе и привести к негативным последствиям для озера.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИПРЭК СО РАН, проект FUFRR-2021-0006

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базарова Б. Б. Содержание химических элементов в харовых водорослях оз. Кенон // Вода: химия и экология. 2013. № 11. С. 54–60.
2. Базарова Б. Б., Куклин А. П. О современном состоянии и многолетней динамике флоры и растительности озера Гусиное (Республика Бурятия) // Экосистемы. 2021. № 25. С. 72–81. <https://doi.org/10.18411/2414-4738-2021-25-72-81>
3. Бобкова Е. А., Иметхенов А. Б. Влияние сточных вод г. Гусиноозерск на ихтиофауну оз. Гусиное // Вестник НГУ. 2011. N 3(34). С.176–181.
4. Богданов В. Т. Гидрохимическое состояние вод озера Гусиное // Гидрохимия рек и озер в условиях резко континентального климата. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1977. С. 113–123.
5. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». – Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2023. – 372 с.
6. Гусиноозерская экспедиция П.С. Михно 1927 г. (Динамика природных комплексов Гусиноозерской котловины и аспекты культурного наследия Селенгинского среднего-рья) / под ред. Э.А. Батоцыренова. Улан-Удэ: ЭКОС, 2016. 168 с.
7. Дугаров Ж. Н., Бурдуковская Г., Батуева М. Д., Балданова Д. Р., Сондуева Л. Д., Жеп-холова О. Б., Мазур О. Е. Изменения видового состава паразитов окуня *Perca fluviatilis* оз. Гусиное (бассейн оз. Байкал) вследствие депрессии и последующего восстановле-

- ния численности хозяина // Экология. 2018. № 3. С. 220–224. <https://doi.org/10.1134/S1067413618030037>
8. Дугаров Ж. Н., Пронин Н. М. Разнообразие фауны и динамика видового богатства и доминирования в сообществах паразитов в возрастном ряду речного окуня *Perca fluviatilis* // Экология. 2017. № 1. С. 20–27. <https://doi.org/10.7868/S0367059716060044>
 9. Кожов М. М. Пресные воды Восточной Сибири: (бассейн Байкала, Ангары, Витима, верхнего течения Лены и Нижней Тунгуски). Иркутск: Иркут. обл. гос. изд-во, 1950. 368 с.
 10. Матафонов Д. В., Базова Н. В. Новый подход к организации сети станций для мониторинга озёрных водоёмов Бурятии по организмам макрозообентоса: первые результаты применения и анализ пространственного распределения амфипод в озёрах Еравнинской системы как пример его реализации // Известия ИГУ. Серия «Биология. Экология». 2018. Т. 24. С. 86–109. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2018.24.86>
 11. Матвеев А. Н., Юрьев А. Л., Самусенок В. П., Вокин А. И., Самусенок И. В. Изменение состава ихтиофауны оз. Гусиное (водоема-охладителя Гусиноозерской ГРЭС) и роли в ней чужеродных видов // Экология водоемов-охладителей энергетических станций: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита: ЗаБГУ. 2017. С. 340–345.
 12. Моружи И. В., Пищенко Е. В., Некрасов А. С. Биологические ресурсы озера Гусиное Селенгинского района Республики Бурятия // Вестник НГАУ. 2016. № 4. С. 48–55.
 13. Обязов В. А. Изменения современного климата и оценка их последствий для природных и природно-антропогенных систем Забайкалья. Казань: автореферат на соиск. уч. ст. д.г.н., 2014. 38 с.
 14. Семерной В. П., Матафонов Д. В., Базова Н. В. Фауна и пространственное распределение малощетинковых червей (Annelida: Oligochaeta) в озере Гусиное (бассейн озера Байкал) // Известия ИГУ. Сер.: Биология. Экология. 2014. Т. 10. С. 92–107.
 15. Ульзетуева И. Д., Хахинов В. В., Намсараев Б. Б., Звонцов И. В. Гусиное озеро как индикатор загрязнения акватории Байкала // Экология и промышленность России. 2001. № 9. С. 30–31.
 16. Утюжникова Н. С., Ширанова Г. С., Черняк Е. И., Вялков А. И., Морозов С. В., Батоев В. Б. Двустворчатый моллюск (*Colletopterum ponderosum sedakovi*) универсальный биоиндикатор загрязнения бассейна озера Байкал стойкими органическими загрязнителями // Инженерная экология. 2011. N 1. С. 55–63.
 17. Цыдыпов Б. З., Андреев С. Г., Аюржанаев А. А., Содномов Б. В., Гуржапов Б. О., Батоцыренов Э. А., Павлов И. А., Ширеторова В. Г., Ульзетуева И. Д., Габеева Д. А., Раднаева Л. Д., Гармаев Е. Ж. Влияние сбросов Гусиноозерской ГРЭС на термический и гидрохимический режим озера Гусиное // Известия Иркутского государственного университета. 2017. Т. 22. С. 135–150.
 18. Чебунина Н. С., Пахахинова З. З., Бешенцев А. Н., Батоев В. Б. Оценка влияния сброса теплых вод Гусиноозерской ГрЭС на динамику ледового режима озера Гусино (Западное Забайкалье) // Научный журнал КубГАУ, 2016. № 116 (02). С. 1–8.
 19. Шашуловский В. А., Мосияш С. С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: Т-во научных изданий КМК. 2010. 250 с.
 20. Шевелева Н. Г., Зайцева Е. П. Зоопланктон озера Гусиное в зоне влияния Гусиноозерской ГРЭС // Вода: химия и экология. 2015. № 5. С. 41–46.
 21. Ширеторова В. Г., Раднаева Л. Д., Базаржапов Ц. Ж., Тулохонов А. К., Ли Ц., Донг С. Химический состав вод озера Гусиное – водоема-охладителя Гусиноозерской ГРЭС//

- Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник научных трудов XX Международной научно-практической конференции: в 2 томах. Москва: Российский университет дружбы народов. 2019. С. 359–364.
22. Ширапова Г. С., Устюжина Н. С., Рабина О. А., Вялкова А. И., Морозов С. В., Батоев В. Б. Загрязнение хлорорганическими пестицидами и полихлорированными бифеналами бассейна озера Байкал: озеро Гусиное // Химия в интересах устойчивого развития. 2013. № 21. С. 197–205.
 23. Экология озера Гусиное / под ред. Борисенко И. М., Пронин Н. М. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 1994. 199 с.
 24. Debén S., Aboal J. R., Giraldez P., Varela Z., Fernández J. A. Developing a Biotechnological Tool for Monitoring Water Quality: In Vitro Clone Culture of the Aquatic Moss *Fontinalis anti-pyretica* // Water. 2019. Vol. 11(1). P. 145. <https://doi.org/10.3390/w11010145>
 25. Gecheva, G., Yurukova, L. Water pollutant monitoring with aquatic bryophytes: a review // Environ Chem Lett. 2014. Vol. 12. P. 49–61. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0429-z>
 26. Grinberga L., Sprunge G. Potential impact of climate change on aquatic vegetation of river Salaca, Latvia // Proc. of the Latvian Academy of Sciences. 2008. Vol. 62. P. 34–39. <https://doi.org/10.2478/v10046-008-0011-4>
 27. Kufel L., Kufel I. Chara beds acting as nutrient sinks in shallow lakes – a review // Aquatic Botany. 2002. Vol. 72, № 3–4. P. 249–260. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00204-2)
 28. Lambert S. J., Davy A. J. Water quality as a threat to aquatic plants: discriminating between the effects of nitrate, phosphate, boron and heavy metals on charophytes // New Phytologist. 2011. N 189. С. 1051–1059. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03543.x>
 29. Madsen D. J., Wersal M. R., Tyler M., Gerard P. The distribution and abundance of aquatic macrophytes in Swan lake and Middle lake, Minnesota // J. Fresh. Ecol. 2006. Vol. 21. P. 421–429. <https://doi.org/10.1080/02705060.2006.9665019>
 30. Pukacz A., Pełechaty M., Pełechata A. The relation between charophytes and habitat differentiation in temperate lowland lakes // Polish journal of ecology. 2013. Vol. 61 (1). P. 105–118.
 31. Rip W. J., Ouboter M. R. L., Los H. J. Impact of climatic fluctuations on Characeae biomass in a shallow, restored lake in The Netherlands // Hydrobiologia. 2007. Vol. 584 (1). P. 415–424. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6399-2_37
 32. Schneidera S. C., Garcíab A., Martín-Closasc C., Chivasb A. R. The role of charophytes (Charales) in past and present environments: An overview // Aquatic Botany. 2015 .Vol.120. P. 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.10.001>
 33. Tsydenova B. V., Dagurova O. P., Garankina V. P., Dambaev V. B., Matafonov D. V., Baturlina O. A. Abundance and taxonomic composition of bacterioplankton in freshwater Lake Gusinoe (Buryatia) in the warm water zone of the Gusinoozerskaya thermal power plant. // J. Sib. Fed. Univ. Biol. 2018. N 11 (4). P. 356–366. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0078>

**Assessment of Lake Gusinoe Ecosystem
Based on Macrophyte Analysis
(Republic of Buryatia)**

B. B. Bazarova

*Institute of Natural Resources Ecology and Cryology SB RAS
E-mail: balgit@mail.ru*

Lake Gusinoe is the largest lake in the Baikal natural territory after Lake. Baikal, around which the Gusnoozersky industrial complex is formed. In the macrophyte flora of the lake. 27 species from 21 families have been identified. The spatial structure of vegetation is determined by the morphometric characteristics of the lake's littoral zone. The northern and southern sectors of the lake are the most overgrown. Compared to previous years of research, an increase in the area of charophyte and moss thickets was revealed. The progressive overgrowing of the lake helps to maintain the processes of self-purification of the ecosystem, removes pollutants and nutrients from circulation and ensures the sustainable development of the ecosystem. The ability of the lake ecosystem to maintain the overall level of productivity due to restructuring of the structure is also evidenced by data on other communities of hydrobionts (zooplankton, zoobenthos and ichthyocenoses). The results of our studies of the chemical composition of macrophytes of Lake. Gusinoe showed, in comparison with the data of the 90s, the concentrations of chemical elements in macrophytes decreased. The recorded ecological state of the lake is determined by a complex of factors, both natural and natural (water level, temperature rise, littoral morphometry, chemical composition of water).

Keywords: macrophytes, Gusinoe Lake, chemical elements, technogenic, chemical pollution.

REFERENCES

1. Bazarova B. B. Soderzhaniye khimicheskikh elementov v kharovykh vodoroslyakh oz. Kenon // Voda: khimiya i ekologiya. 2013. № 11. S. 54–60.
2. Bazarova B. B., Kuklin A. P. O sovremennom sostoyanii i mnogoletney dinamike flory i rastitel'nosti ozera Gusinoe (Respublika Buryatiya) // Ekosistemy. 2021. № 25. S. 72–81 <https://doi.org/10.18411/2414-4738-2021-25-72-81>
3. Bobkova Ye. A., Imetkhenov A. B. Vliyaniye stochnykh vod g. Gusinoozersk na ikhtiofaunu oz. Gusinoe // Vestnik NG U. 2011. № 3(34). S.176–181.
4. Bogdanov V. T. Gidrokhimicheskoye sostoyaniye vod ozera Gusinoe // Gidrokhiimiya rek i ozer v usloviyakh rezko kontinental'nogo klimata. Vladivostok: DVNTS AN SSS R. 1977. S. 113-123.
5. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii ozera Baykal i merakh po yego okhrane v 2022 godu». – Irkutsk: FGBUN Institut geografii im. V. B. Sochavy SO RAN, 2023. 372 s.
6. Gusinoozerskaya ekspeditsiya P. S. Mikhno 1927 g. (Dinamika prirodnykh kompleksov Gusinoozerskoy kotloviny i aspekty kul'turnogo naslediya Selenginskogo srednegor'ya) / pod red. E. A. Batotsyrenova. Ulan-Ude: EKOS, 2016. 168 s.
7. Dugaro ZH. N., Burdukovskaya T. G., Batuyeva M. D., Baldanova D. R., Sonduyeva L. D., Zhepkholova O. B., Mazur O.Ye. Izmeneniya vidovogo sostava parazitov okunya Perca fluviatilis oz. Gusinoe (basseyn oz. Baykal) vsledstviye depressii i posleduyushchego vosstanovleniya chislennosti khozyaina // Ekologiya. 2018. № 3. S. 220–224. <https://doi.org/10.1134/S1067413618030037>

8. Dugarov ZH. N., Pronin N. M. Raznoobrazie fauny i dinamika vidovogo bogatstva i dominirovaniya v soobshchestvakh parazitov v vozrastnom ryadu rechnogo okunya *Perca fluviatilis* // *Ekologiya*. 2017. № 1. S. 20–27. <https://doi.org/10.7868/S0367059716060044>
9. Kozhov M. M. Presnyye vody Vostochnoy Sibiri: (basseyn Baykala, Angary, Vitima, verkhnego techeniya Leny i Nizhney Tunguski). Irkutsk: Irkut. obl. gos. izd-vo, 1950. 368 s.
10. Matafonov D. V., Bazova N. V. Novyy podkhod k organizatsii seti stantsiy dlya monitoringa ozornykh vodoyemov Buryatii po organizmam makrozoobentosa: pervyye rezul'taty primeneniya i analiz prostranstvennogo raspredeleniya amfipod v ozorakh Yeravninskoy sistemy kak primer yego realizatsii // *Izvestiya IG U. Seriya «Biologiya. Ekologiya»*. 2018. T. 24. S. 86–10. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2018.24.86>
11. Matveyev A. N., Yur'yev A. L., Samusenok V. P., Vokin A. I., Samusenok I. V. Izmeneniye sostava ikhtiofauny oz. Gusinoye (vodoyema-okhladitelya Gusinoozerskoy GRES) i roli v ney chuzherodnykh vidov // *Ekologiya vodoyemov-okhladiteley energeticheskikh stantsiy: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem*. Chita: ZaBG U. 2017. S. 340–345.
12. Moruzi I. V., Pishchenko Ye. V., Nekrasov A. S. Biologicheskkiye resursy ozera Gusinoye Selenginskogo rayona Respubliki Buryatiya // *Vestnik NGA U*. 2016. № 4. S. 48–55.
13. Obyazov V. A. Izmeneniya sovremennogo klimata i otsenka ikh posledstviy dlya prirodnnykh i prirodno-antropogennykh sistem Zabaykal'ya. Kazan': avtoreferat na soisk. uch. st. d.g.n., 2014. 38 s.
14. Semernoy V. P., Matafonov D. V., Bazova N. V. Fauna i prostranstvennoye raspredeleniye maloshchetinkovykh chervey (Annelida: Oligochaeta) v ozere Gusinoye (basseyn ozera Baykal) // *Izvestiya IG U. Ser.: Biologiya. Ekologiya*. 2014. T. 10. S. 92–107.
15. Ul'zetuyeva I. D., Khakhinov V. V., Namsarayev B. B., Zvontsov I. V. Gusinoye ozero kak indikator zagryazneniya akvatorii Baykala // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2001. № 9. S. 30–31.
16. Utyuzhnikova N. S., Shirapova G. S., Chernyak Ye. I., Vyalkov A. I., Morozov S. V., Batoyev V. B. Dvustvorchatyy mollyusk (*Colletopterum ponderosum* sedakovi) universal'nyy bio-indikator zagryazneniya basseyna ozera Baykal stoykimi organicheskimi zagryaznitelyami // *Inzhenernaya ekologiya*. 2011. № 1. S. 55–63.
17. Tsydyapov B. Z., Andreyev S. G., Ayurzhanayev A. A., Sodnomov B. V., Gurzhapov B. O., Batotsyrenov E. A., Pavlov I. A., Shiretorova V. G., Ul'zetuyeva I. D., Gabeyeva D. A., Radnayeve L. D., Garmayev Ye. ZH. Vliyaniye sbrosov Gusinoozerskoy GRES na termicheskyy i gidrokhimicheskyy rezhim ozera Gusinoye // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. T. 22. S. 135–150.
18. Chebunina N. S., Pakhakhinova Z. Z., Beshentsev A. N., Batoyev V. B. Otsenka vliyaniya sbrosa teplykh vod Gusinoozerskoy GRES na dinamiku ledovogo rezhima ozera Gusinogo (Zapadnoye Zabaykal'ye) // *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2016. № 116 (02). S.1–8.
19. Shashulovskiy V. A., Mosiyash S. S. Formirovaniye biologicheskikh resursov Volgogradskogo vodokhranilishcha v khode suksessii yego ekosistemy. M.: T-vo nauchnykh izdaniy KM K. 2010. 250 s.
20. Sheveleva N. G., Zaytseva Ye. P. Zooplankton ozera Gusinoye v zone vliyaniya Gusinoozerskoy GRES // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2015. № 5. S. 41–46.
21. Shiretorova V. G., Radnayeve L. D., Bazarzhapov TS. ZH., Tulokhonov A. K., Li TS., Dong S. Khimicheskyy sostav vod ozera Gusinoye - vodoyema-okhladitelya Gusinoozerskoy GRES // *Aktual'nyye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya. Sbornik nauchnykh trudov XX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 tomakh*. Moskva: Rossiyskiy universitet druzhby narodov. 2019. S.

22. Shirapova G. S., Ustyuzhina N. S., Rabina O.A., Vyalkova A. I., Morozov S. V., Batoyev V. B. Zagryazneniye khlororganicheskimi pestitsidami i polikhlorirovannymi bifenalami basseyna ozera Baykal: ozero Gusinoe // Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya. 2013. № 21. S. 197–205.
23. Ekologiya ozera Gusinoe / pod red. Borisenko I. M., Pronin N. M. Ulan-Ude: Izd-vo BNTS SO RA № 1994. 199 s.
24. Debén S., Aboal J. R., Giráldez P., Varela Z., Fernández J. A. Developing a Biotechnological Tool for Monitoring Water Quality: In Vitro Clone Culture of the Aquatic Moss *Fontinalis anti-pyretica* // Water. 2019. Vol. 11(1). P. 145. <https://doi.org/10.3390/w11010145>
25. Gecheva, G., Yurukova, L. Water pollutant monitoring with aquatic bryophytes: a review // Environ Chem Lett. 2014. Vol. 12. P. 49–61. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0429-z>
26. Grinberga L., Springe. G. Potential impact of climate change on aquatic vegetation of river Salaca, Latvia // Proc. of the Latvian Academy of Sciences. 2008. Vol. 62. P. 34–39. <https://doi.org/10.2478/v10046-008-0011-4>
27. Kufel L., Kufel I. Chara beds acting as nutrient sinks in shallow lakes – a review // Aquatic Botany. 2002. Vol. 72, № 3–4. P. 249–260. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00204-2)
28. Lambert S. J. Davy A. J. Water quality as a threat to aquatic plants: discriminating between the effects of nitrate, phosphate, boron and heavy metals on charophytes // New Phytologist. 2011. № 189. C. 1051–1059. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03543.x>
29. Madsen D. J., Wersal M. R., Tyler M., Gerard P. The distribution and abundance of aquatic macrophytes in Swan lake and Middle lake, Minnesota // J. Fresh. Ecol. 2006. Vol. 21. P. 421–429. <https://doi.org/10.1080/02705060.2006.9665019>
30. Pukacz A, Pełechaty M, Pełechata A. The relation between charophytes and habitat differentiation in temperate lowland lakes // Polish journal of ecology. 2013. Vol. 61 (1). P. 105–118.
31. Rip W. J., Ouboter M. R. L., Los H. J. Impact of climatic fluctuations on Characeae biomass in a shallow, restored lake in The Netherlands // Hydrobiologia. 2007. Vol. 584 (1). P. 415–424. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6399-2_37
32. Schneider S. C., Garcíab A., Martín-Closasc C, Chivasb A. R. The role of charophytes (Charales) in past and present environments: An overview // Aquatic Botany. 2015 .Vol. 120. P. 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.10.001>
33. Tsydenova B. V., Dagurova O. P., Garankina V. P., Dambaev V. B., Matafonov D. V., Baturina O. A. Abundance and taxonomic composition of bacterioplankton in freshwater Lake Gusinoe (Buryatia) in the warm water zone of the Gusinoozerskaya thermal power plant. // J. Sib. Fed. Univ. Biol. 2018. № 11 (4). P. 356–366. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0078>

УДК 911.52

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОСИСТЕМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАРГУЗИНСКОГО ХРЕБТА (ПРИБАЙКАЛЬЕ)

И.Н. Биличенко

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: irinabilnik@mail.ru

Исследования проведены в Прибайкалье, в северо-восточной его части — на участке Баргузинского хребта. Это особо охраняемая территория Прибайкалья (Баргузинский заповедник), которая нуждается в научно-обоснованном планировании природопользования с изучением компонентов ландшафтов по отдельности и в целом, а также в создании ландшафтных карт, которые отражают современное состояние этих ландшафтов. В ландшафтной структуре хребта преобладают гольцовые геосистемы, на ключевом участке гольцовые и горно-таежные занимают равные площади. На последнем подробно изучалась растительность как наиболее быстро реагирующий компонент на различные изменения. Всего было сделано около сорока подробных геоботанических описаний. Ландшафтная карта 1:50000 масштаба создана в результате проведенных полевых работ, анализа космических снимков и топографических карт. На топологическом уровне на карте отображена ландшафтная структура ранга фаций.

Ключевые слова: Горные геосистемы, Баргузинский хребет, гольцовые и горно-таежные геосистемы, картографирование, растительность

DOI: 10.31857/S0869607124030027, **EDN:** LXLXLS

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением в развитии природопользования Прибайкалья являются действия по сохранению его геосистем в естественном состоянии. Это в основном горные геосистемы, испытывающие в последнее время на себе как глобальные изменения климата, так и растущее антропогенное воздействие. Одним из фундаментальных направлений в исследовании горных геосистем является пространственное представление дифференциации территории и впоследствии ее картографирование [9].

Исследования проводились на Баргузинском хребте, который окаймляет озеро Байкал с северо-востока. Это ступенчатое глыбовое поднятие, состоящее из протерозойских гранитов, гнейсов, кембрийских песчаников и конгломератов. Это один из самых высоких хребтов Прибайкалья с крутым восточным макросклоном и пологим западным.

На хребте отчетливо прослеживается смена высотных поясов. Высокогорный участок (1800–2800 м) изобилует различными формами древнего оледенения: цирками, карами, карлингами, крутыми склонами троговых долин. Они интенсивно разрушаются под действием физического выветривания и склоновых гравитаци-

онных процессов. В верхних частях склонов северной и восточной экспозиций много снежников. Они формируются в понижениях и часто являются перелеты-вающими. Часто под ними образуются альпийские лужайки. Среднегорный пояс (1600–1800 м) характеризуется прямыми и выпуклыми склонами, которые покрыты эрозионными ложбинами и крупноглыбовыми коллювиальными образованиями. Здесь также много отвесных скал, останцов и узких водораздельных гребней. Для склонов низкогорья характерны склоновый смыв и десерпция, расчлененный рельеф (600–1000 м).

Значительная площадь хребта занята гольцовыми геосистемами, которые существенно превосходят на хребте горнотаежные (около 60%). Отмечается широкое распространение в гольцах зарослей кедрового стланика [3] с куртинами золотистого рододендрона вокруг, с наличием синузий бадана и шикши, с покровом. Выположенные вершины покрыты щебнистыми тундрами. Среди кустарничковых тундр наиболее всего представлены голубичные, рододендроновые, дриадовые и шикшевые сообщества по понижениям рельефа, овсяницево-связаны с пологими сухими и хорошо прогреваемыми склонами и выровненными водоразделами. На границе леса присутствует пихта сибирская, образующая баданово-черничные моховые сообщества с кедром, елью и кедровым стлаником.

Баргузинский хребет относится к Джугджурской горнотаежной области, Прибайкальской гольцово-горнотаежной и котловинной провинции [2]. На региональном уровне наибольшие площади занимают гольцовые субальпинотипные геосистемы, гольцовые задернованные, горно-таежные ограниченного развития и горно-таежного редуцированного развития [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение геосистем Баргузинского хребта проводилось согласно учениям о геосистемах сибирской географической школы [7]. Ранее автором здесь в разные годы были проведены среднемасштабные исследования [6, 10, 11] с использованием регионально-типологического подхода [8]. Данная работа посвящена крупномасштабным исследованиям на уровне фаций (1:50 000), представляющие собой здесь однородные природные геосистемы топологического уровня и различающиеся по режиму увлажнения, геолого-структурным особенностям горных пород, положению в рельефе, растительному и почвенному покрову.

В камеральных условиях проводилось дешифрирование космических снимков Landsat – 7, 8 с созданием предварительных схем дешифрирования элементов ландшафтов. В поле на ключевом участке уточнялись границы и содержание выделенных ландшафтных контуров. Здесь было сделано около сорока подробных описаний ландшафтов с акцентом на один из самых показательных динамичных компонентов – растительность. В дальнейшем проводился ландшафтный анализ и синтез, создавалась картографическая структура территории исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Циркуляция атмосферы региона и характер рельефа определяют режим атмосферных осадков Баргузинского хребта. Западные склоны хребта получают атмосферных осадков 1200–1500 мм/год, восточные – 800–1000 мм/год. Повышенное испарение с озера в осенний период дополнительно увлажняет байкальские склоны и способствует развитию здесь мощного снежного покрова. Высота

его на Баргузинском хребте нарастает по мере продвижения в горы с 50–60 см на побережье, до 70–80 см в лесном поясе, 150–160 см в подгольцовом поясе и 180–200 см в гольцовом [1]. В последнем из-за сильных ветров высота снежного покрова на открытых местах ниже, а на подветренных склонах и в понижениях рельефа образуются уплотненные его скопления, являющиеся опасными из-за схода лавин.

Одну пятую часть ландшафтной структуры хребта занимают крутосклоновые скалисто-грубообломочные геосистемы, немного меньше склоновые кустарниковые кедрово-стланиковые и скальные водораздельные и каровые. На хребте, в гольцовом поясе расположено большое количество озер, в основном карового происхождения [11].

В гольцах распространена травяно-кустарничково-лишайниковая тундра, на плоских местах и в понижениях рельефа осоково-моховая. Конусы и шлейфы осыпей окаймляют крутые склоны троговых долин и скалистые грубообломочные вершинные поверхности. Верхняя граница лесного пояса на западном склоне проходит на высоте 1100–1250 м, а на восточном 1300–1400 м.

Согласно районированию [5], территория ключевого участка (центральная часть Баргузинского хребта) относится к Баргузинскому высокогорно-гольцовому округу, Южному (Чивыркуйскому) плосковершинному редколесно-гольцовому району и Северо-Восточному береговому подгорно- и горно-таежному округу.

Исследуемый район включает бассейн реки Давша с горнотаежными геосистемами и гольцовую часть – “Долину семи озер” в верховье ручья Малый, впадающего в р. Большая. Длина реки Давша составляет около 30 км, площадь водосборного бассейна – 94 км².

На рисунке 1 показаны места геоботанических описаний, от гольцового участка и далее вдоль реки Давша к озеру Байкал. В днище троговой долины произрастает кедровый стланник (*Pinus pumila*) (описание 1, рис. 1). К нему здесь присоединяется ерник (*Betula divaricata*). Травянисто-кустарничковый покров богатый – из бадана (*Bergenia crassifolia*), черники (*Vaccinium myrtillus*), ветренницы (*Anemone baicalensis*), горечавки (*Gentiana grandiflora*), аконита (*Aconitum rubicundum*), лагопсиса (*Lagopsis darwiniana*), чемерицы (*Veratrum lobelianum*), прострела (*Pulsatilla patens*) и др. с оленем мохом и кладониями (рис. 2, а). Здесь же, на подгольцовых террасах (2, рис. 1) много дресвяных участков, лишайниковых пустошей с куртинами из бадана, рододендрона (*Rhododendron aureum*), черники, овсяницы (*Festuca lenensis*), осок, сибальдии (*Sibbaldia procumbens*) (рис. 2, б).

Выровненные небольшие террасы по берегам ключа Малого заняты ерником с богатым травянисто-кустарничковым ярусом из бадана, черники, ветренницы, купальницы (*Trollius irkutensis*), иван-чая (*Chamaenerion angustifolium*), змееголовника (*Dracocephalum nutans*), пырея (*Elytrigia repens*), душистого колоска (*Anthoxanthum odoratum*) и др. (3, 4, рис. 1). Курумовые участки не так часто встречаются на исследуемой территории. Расположены они в основном на пологих склонах (рис. 2, в).

На высоте 1200 м (5, рис. 1) появляется пихта и береза шерстистая с баданово-черничным моховым травяно-кустарничковым ярусом (рис. 2, г). Далее вниз редколесье переходит в пихтовый баданово-черничный травяно-кустарничковый (линнея (*Linnaea borealis*), майник (*Maianthemum bifolium*), папоротник и др.) лес с обильными всходами пихты, с ерником в подлеске.

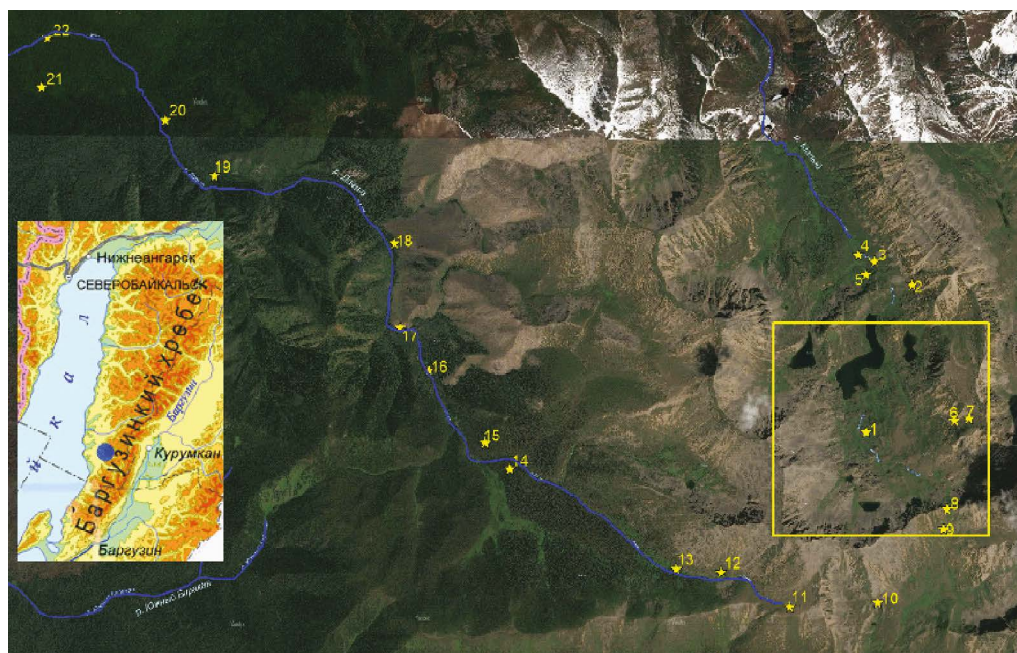


Рис. 1. Ключевой участок (синий кружок на цветной вкладке — район исследования, желтый квадрат — фрагмент ландшафтной карты (рис. 4), 1–22 — номера ландшафтных описаний).

Fig. 1. Key site (blue circle on the color tab — study area, yellow square — fragment of a landscape map (Figure 4), 1–22 — numbers of landscape descriptions).

На рис. 2д представлен склон с-з экспозиции крутизной 25–30° (6, рис. 1), высота 1685 м. Склон щебнисто-грубообломочный с выходами коренных пород с солифлюкционными потоками и ложбинами временных водотоков. Травяно-кустарничковая растительность представлена рододендром золотистым, черникой, баданом толстолистным, овсяницей ленской, шикшей узколистной (*Empetrum stenopetalum*), горечавкой, сибальдией распростертой, ветреницей, ожикой (*Luzula nivalis*), фиалкой одноцветковой (*Viola uniflora*). Из лишайников присутствуют кладонии и цетрарии.

На рис. 2е кедровый стланник высотой до 3,5 м занимает узкую водораздельную поверхность на высоте 1805 м (7, рис. 1). Склон пологий, здесь растет также карликовая березка, золотистый рододендрон, редко можжевельник (*Juniperus*), куртины брусничника (*Vaccinium vitis-idaea*), овсяницы и шикши, в прогалинах кладония альпийская (*Cladina rangiferina*).

Перевал (1750 м) от ручья Малого к ключу Жигуна покрыт щебнистыми и травяными (бадан, дриада (*Dryas*), ветреница, прострел) пустошами с куртинами кедрового стланника и ерника (8, рис. 1). Вниз по склону (9, рис. 1) также идет кедрово-стланник с рододендромом и баданом. Здесь много больших валунов, по ручью — снежников.

Верховье реки Давша (10, рис. 1) и далее перевал (11, рис. 1) покрыт баданово-рододендровой пустошью с черникой, ветреницей, плауном (*Lycopodium*), горечавкой, душистым колоском, фиалкой и др.) с лишайником (рис.3а).

В верховье правого Таркулика и в долине Давши (1500 м) (12, рис. 1), на границе леса разреженно появляется береза шерстистая с карликовой березкой в подросте с баданово-черничным лишайниковым травяно-кустарничковым покровом (овсяница, ветренница, золотарник даурский (*Solidago dahurica*), душистый колосок) (рис.3б).

На левой стороне, на склоне, обращенном к реке, появляется пихта (рис.3в). Далее, по долине идет парковый разнотравный березняк (13, рис. 1) (калужница (*Caltha palustris*), осоки, чемерица, купальница, черника (*Vaccinium myrtillus*), папоротник, горечавка) (рис. 3г). С 1400 м по склонам начинается сомкнутый темнохвойный пихтовый черничный моховый лес (линнея, бадан, осока, брусника) (14, рис. 1). Далее, ниже по долине реки Давша к пихте примешивается кедр с линнеей, черникой, осокой моховые (15, рис. 1).

По правому берегу реки Давша, на выровненной пойме идет березово-пихтовый крупнотравный лес (16, рис. 1) (папоротник страусник (*Matteuccia struthiopteris*), линнея, черника, осока, воронний глаз (*Paris quadrifolia*), иван-чай, аконит). В подлеске ольха, рябина (*Sorbus*), жимолость (*Caprifoliaceae*).

По правому берегу расположена гарь 2006 года (17, рис. 1). Это склон южной экспозиции 25–30°, высота 1500 м, с наличием эрозионных нивально-осыпных процессов, много стоящего и лежащего сухостоя пихты (рис. 3д). В подлеске ольха (*Alnus*), малина (*Rubus idaeus*), ивы, в травяно-кустарничковом ярусе обильны иван-чай. Довольно обильны всходы кедрового стланика. Далее (18, рис. 1), к границе ареала пожара, древостой (темнохвойный) также состоит в основном из невыпавшего сухостоя (рис. 3е).

На выположенной террасе, над долиной реки Давша (правый берег), на высоте 750 м (19, рис. 1) распространен пихтово-осиновый с сосной разнотравно-бадановый лес. В подлеске шиповник (*Rosales*), жимолость и редкий кедровый стланик, в травяно-кустарничковом ярусе бадан, чина (*Lathyrus humilis*), осоки, земляника (*Fragaria vesca*), вика (*Vicia Fabaceae*), лилия мартагон (*Lilium martagon*), костяника (*Rubus saxatilis*), сныть (*Aegopodium alpestre*). Во всходах и подросте обильно возобновляется пихта. Далее, по террасе реки и до озера Байкал идут сосновые бруснично-зеленомошные (20, рис. 1) и березово-сосновые багульниково-брусничные (500 м, (21, рис. 1)) леса. Пихта встречается здесь только в подросте и всходах.

В долине Давши (22, рис. 1) описан высокотравный луг (борщевик (*Heracleum dissectum*), лилия мартагон, герань сибирская (*Geranium sibiricum*), горошек мышиный (*Vicia cracca*), лютик едкий (*Ranunculus acris*), чертополох курчавый (*Carduus crispus*), полевица булавовидная (*Agrostis clavata*), журавельник цикутый (*Eródium cicutarium*), яснотка белая (*Lamium album*) др.

Ниже представлен фрагмент карты геосистем ключевого участка (рис. 4). Это район гольцов, располагающийся выше верхней границы леса. Наибольшую площадь здесь занимают гольцово-задернованные геосистемы плоских переувлажненных щебнистых междуречий осоково-кустарничково моховых и пологосклоновых долинных щебнистых травяно-кустарничковых и кустарниковых. Следующие по площади это субальпинотипные — вершинных конусовидных грубообломочных с отдельными конусами и шлейфами осыпей, селей и лавин и щебнисто-глыбовых вересковых, кедровостланиковых и ерниковых днищ долин.



Рис. 2. Ландшафтные описания.

а — кедровый стланик с обильным травяно-кустарниковым ярусом; б — подгольцовая терраса с древесными участками; в — южный склон, осыпной, кедрово-стланиковый с участками курумов; г — пихтовый баданово-черничный моховый лес на границе леса; д — травяно-кустарничковая тундра на крутом склоне; е — водораздел, покрытый кедровым стлаником.

Fig. 2. Landscape descriptions.



Рис. 3. Ландшафтные описания.

а — баданово-роодендровая пустошь; б — березовый баданово-черничный лишайниковый лес; в — появление пихты (граница леса); г — парковый разнотравный березняк; д — гарь 2006 года; е — сухостойный лес.

Fig. 3. Landscape descriptions.

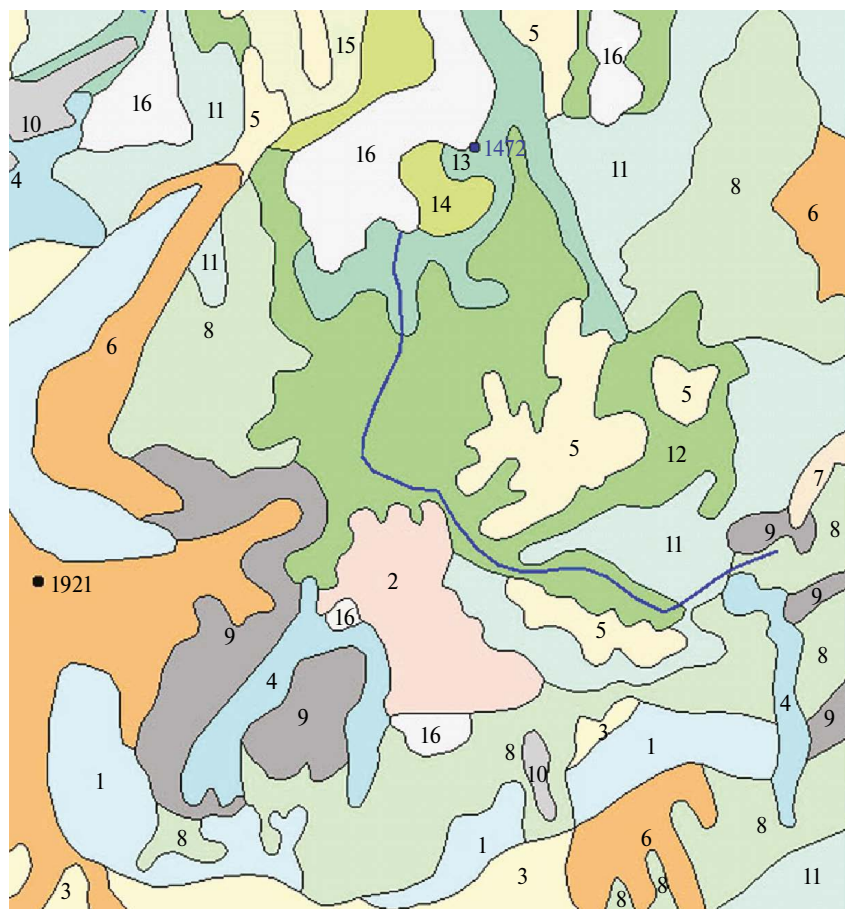


Рис. 4. Фрагмент карты "Геосистемы центральной части Баргузинского хребта (бассейн реки Давша и "Долина семи озер")" (масштаб 1:50 000).

Геом гольцовый альпинотипный. Группы фаций: 1 – водораздельные скальные, сильно расчлененные; 2 – курчавых скал и ригелей; 3 – конусов и шлейфов осыпей; 4 – приснежниковых альпинотипных лужаек; 5 – кустарничково-лишайниковые на моренных отложениях.

Геом гольцовый субальпинотипный. Группы фаций: 6 – крутосклоновые грубообломочные накинполишайниковые; 7 – лавинно-осыпных и селевых склонов; 8 – крутосклоновые грубообломочные с куртинами кедрового стланика.

Геом гольцовый курумный. Группы фаций: 9 – пологосклоновые грубообломочные с выходами коренных пород, накинполишайниковые; 10 – каменных рек и солифлюкционных языков с участками кедрового стланика и ерника.

Геом гольцовый задернованный. Группы фаций: 11 – нижнесклоновые кустарничково-лишайниковые; 12 – днищ трогов кедрово-стланиковые; 13 – днищ трогов травяно-кустарничковые, ерниковые.

Геом горно-таежный долинный. Группы фаций: 14 – пологосклоновые кедрово-стланиковые с редкими березой и пихтой; 15 – долинные пихтовые баданово-черничные и моховые.

Геом аквальный. Группа фаций: 16 – озера ледникового происхождения.

Fig. 4. Map Fragment of the map "Geosystems of the central part of the Barguzin ridge (the Davsha River basin and the "Valley of Seven Lakes")" (scale 1:50 000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Таким образом, при исследовании горно-таежных геосистем Баргузинского хребта были выявлены закономерности ландшафтной структуры топологического уровня, согласно которым была создана карта 1:50 000 масштаба.

Нивально-гляциальные геосистемы исследуемого участка формируются в понижениях горного рельефа. Это сезонные снежники в карах и наледи в долинах рек, неотраженные на карте. Альпинотипные геосистемы распространены выше 1600 м, скальные, сильно расчлененные на моренных отложениях, кустарничково-лишайниковые располагаются по периферии главных водоразделов. Среди субальпинотипных преобладают крутые щебнисто-глыбовые накипнוליшайниковые геосистемы, гольцово-курумовые представлены пологосклоновыми грубообломочными накипнOLIшайниковыми. Гольцово-задернованные представлены травяно-кустарничково-лишайниковыми с кедровым стлаником и ерником геосистемами на пологих склонах и днищах трогов. На высоте 1200–1400 м появляется пихта и береза. Пихтовый с кедром баданово-черничный травяно-кустарничковый лес меняется на пихтово-осиновый с сосной, разнотравно-бадановый и ниже на сосновый с березой брусничный зеленомошный.

Горные геосистемы значительно подвержены изменениям в них природных процессов, которые формируют их структуру, функционирование и динамику, поэтому нуждаются в анализе особенностей функционирования как отдельных компонентов, так и в целом ландшафтов.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания ААА-А-А21–121012190059–5.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ:

1. Ананина Т. Л., Козулин В. М. Долговременная характеристика снежного покрова Западного макросклона Баргузинского хребта (Баргузинский заповедник) / Снежный окров, атмосферные осадки, аэрозоли: технология, климат и экология. Материалы II-ой Байкальской международной научно-практической конференции, Иркутск, 25–30 июня 2018 года / Редактор Н. И. Янченко. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, – 2018. – С. 212–217.
2. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. М-6 1:1 500 000. Михеев В. С., Ряшин В. А. М.: ГУГК, 1977. – 4 л.
3. Моложников В. Н. Кедровый стланик горных ландшафтов Северного Прибайкалья. М.: Наука, 1975. 203 с.
4. Плюснин В. М. Ландшафтный анализ горных территорий. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. – 257 с.
5. Плюснин В. М., Сороковой А. А. Геоинформационный анализ ландшафтной структуры Байкальской природной территории. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2013. 187 с.
6. Распутина Е. А., Цыганкова М. В., Биличенко И. Н., Королькова Е. Э., Софронов А. П., Бардаш А. В. Ландшафты центральной экологической зоны Байкальской природной территории в пределах Республики Бурятия и их устойчивость к рекреационной нагрузке: оценка и картографирование // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 10. – С. 20–32. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-952-10-20-32>
7. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Наука, 1978 – 317 с.

8. Семенов Ю. М., Суворов Е. Г. Геосистемы и комплексная физическая география // География и природные ресурсы. – 2007. – № 3. – С. 11–18.
9. Суворов, Е. Г., Новицкая Н. И. Организация структуры растительности геосистем юго-западного Прибайкалья // География и природные ресурсы. – 2015. – № 4. – С. 53–67.
10. Bilichenko I. N., Sedykh S. A. Mapping of Geosystems of the Northern Part of Barguzin Range. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 381 (2019) 012013.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/0120138>
11. Plyusnin V. M., Bilichenko I. N. and Sedykh S. A. Spatio-temporal Organization of Mountain Taiga Geosystems of the Baikal Natural Territory Geography and Natural Resources, 2018. V. 39. No. 2. P. 130–139.

Study of the Geosystems of the Central Part of the Barguzinskii Range (Gisbaikalia)

I. N. Bilichenko

*The V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya St., 1
E-mail: irinabilnik@mail.ru*

The research was carried out in the Baikal region, in its northeastern part – in the Barguzinsky ridge. This is a specially protected area of the Baikal region (Barguzinsky Reserve, which requires scientifically based environmental management planning with the study of landscape components individually and as a whole, as well as the creation of landscape maps that reflect the current state of these landscapes. The landscape structure of the ridge is dominated by alpine geosystems. In the key area, char and mountain taiga forests occupy equal areas. At the latter, vegetation was studied in detail as the most quickly responsive component to various changes. In total, about forty detailed geobotanical descriptions were made. The 1:50,000 scale landscape map was created as a result of field work, analysis of satellite images and topographic maps. At the topological level, the map displays the landscape structure of the facies rank.

Keywords: Mountain geosystems, Barguzinskii ridge, alpine and mountain-taiga geosystems, mapping, vegetation

REFERENCES

1. Ananina T. L., Kozulin V. M. Long-term characteristics of the snow cover of the Western macroslope of the Barguzinsky Range (Barguzinsky Reserve) / Snow cover, atmospheric precipitation, aerosols: technology, climate and ecology. Materials of the II-nd Baikal International Scientific and Practical Conference, Irkutsk, June 25–30, 2018 / Editor N. I. Yanchenko. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2018, P. 212–217. (in Russian)
2. Landscapes of the south of Eastern Siberia. Map. Scale 1: 1 500 000. Mikheev V. S., Ryashin V. A. Moscow: GUGK, 1977. 4 p. (in Russian). Molozhnikov V. N. Siberian dwarf pine in the mountain landscapes of the Northern Baikal region. Moscow: Nauka, 1975. 203 p. (in Russian)
3. Molozhnikov V. N. Siberian dwarf pine in the mountain landscapes of the Northern Baikal region. Moscow: Nauka, 1975. 203 p. (in Russian)

4. *Plyusnin V. M.* Landscape analysis of mountain territories. Irkutsk, Publishing house of the Institute of Geography SB RAS, 2003. 257 p. (in Russian)
5. *Plyusnin V. M., Sorokovoi A. A.* Geoinformation analysis of the landscape structure of the Baikal natural territory. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 2013. 187 p. (in Russian)
6. *Rasputina E. A., Tsygankova M. V., Bilichenko I. N., Korolkova E. E., Sofronov A. P., Bardash A. V.* Landscapes of the central ecological zone of the Baikal natural territory within the Republic of Buryatia and their resistance to recreational load: assessment and mapping. *Geodesy and Cartography*, 2019. V. 80. No. 10. P. 20–32. (in Russian).
<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-952-10-20-32>
7. *Sochava V. B.* Introduction to the doctrine of geosystems. Novosibirsk: Nauka Publishing House, 1978. 317 p. (in Russian)
8. *Semenov Yu. M., Suvorov E. G.* Geosystems and complex physical geography. *Geography and natural resources*. 2007. № 3. P. 11–18. (in Russian)
9. *Suvorov E. G., Novitskaya N. I.* Organization of the vegetation structure of geosystems in the southwestern Baikal region. *Geography and natural resources*, 2015. № 4. P. 53–67. (in Russian)
10. *Bilichenko I. N., Sedykh S. A.* Mapping of Geosystems of the Northern Part of Barguzin Range. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 381 (2019) 012013.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/0120138>.
11. *Plyusnin V. M., Bilichenko I. N. and Sedykh S. A.* Spatio-temporal Organization of Mountain Taiga Geosystems of the Baikal Natural Territory *Geography and Natural Resources*, 2018. V. 39. № 2. P. 130–139.

УДК 504.7:630

АССИМИЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА ЛЕСАМИ КАК ЭКОСИСТЕМНАЯ УСЛУГА: КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ И НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «ЧИКОЙ»

В. С. Брезгин^{а,*}, Г. М. Агафонов^{б,**}

^аИнститут природных ресурсов, экологии и криологии
Сибирского отделения Российской академии наук, Чита, Россия

^бНациональный парк «Чикой»

* E-mail: monmanage@bk.ru

** E-mail: agmles51@gmail.com

В статье представлены результаты оценки роли лесов Забайкальского края и национального парка «Чикой» в поглощении атмосферного углерода. Расчеты выполнены на основе данных государственного лесного реестра о породном и возрастном составе лесных насаждений за 2005–2021 гг. с использованием методики, учитывающей коэффициенты прироста. Полученные количественные оценки роли лесов региона в депонировании углерода подтверждают необходимость расширения площади ООПТ и обеспечения рационального лесопользования для сохранения данной экосистемной функции лесов Забайкалья.

Ключевые слова: CO₂, двуокись углерода, эмиссия двуокиси углерода, поглощение парниковых газов, ассимиляционный потенциал, Забайкальский край, климатическая политика, национальный парк «Чикой»

DOI: 10.31857/S0869607124030035, EDN: LLSTCO

ВВЕДЕНИЕ

Леса играют ключевую роль в регулировании состава атмосферы и смягчении последствий изменения климата. Они выступают как естественные накопители углерода, поглощая и депонируя атмосферный CO₂.

В последние десятилетия исследование роли лесов в глобальном углеродном цикле стало одним из приоритетных направлений в экологии и климатологии. Современные исследования в этой области можно разделить на несколько ключевых направлений.

Уточнение методов оценки углеродного баланса лесов [Замолодчиков и др., 2017; Röhling et al., 2016] предлагают усовершенствованные методики оценки запасов и потоков углерода в лесных экосистемах.

Роль бореальных лесов в глобальном углеродном цикле [Gauthier et al., 2015] подчеркивают особую роль северных лесов, к которым относятся и леса Забайкалья, в регулировании климата.

Исследования по оценке влияния лесопользования на углеродный баланс [Giasson et al., 2023] демонстрируют, как различные практики лесопользования могут влиять на способность лесов поглощать и удерживать углерод.

В контексте этих глобальных исследований особую актуальность приобретает оценка роли региональных лесных экосистем, таких как леса Забайкалья, в поглощении атмосферного углерода.

Цель данного исследования – оценить вклад лесов Забайкальского края и национального парка «Чикой» в ежегодное накопление углерода в биомассе по данным государственного лесного реестра за период с 2005 по 2021 гг. Особый интерес представляет сравнение поглотительной способности лесов ООПТ (на примере национального парка «Чикой») и лесов Забайкальского края в целом. Полученные результаты важны для обоснования мер по сохранению и расширению величины поглощения углерода лесами региона в условиях изменения климата [Пыжева Ю.И., Пыжев А.И., Зандер Е.В., 2019].

МЕТОДЫ

В данном исследовании мы оцениваем нетто-первичную продукцию (NPP) древостоев, которая, хотя и связана с поглощением CO_2 , не является прямым эквивалентом потока углерода. Наш подход основан на использовании данных государственного лесного реестра и коэффициентов прироста, что позволяет провести оценку на большой территории и за длительный период времени.

Расчет величины поглощения углерода растущими древостоями осуществлен на основе методики, использующей коэффициенты прироста [Исаев, Коровин и др., 1995].

Оценка была произведена с учетом породного и возрастного состава в соответствии с данными государственного лесного реестра [Брезгин В.С., Глазырина И.П., 2023].

В расчеты принималась исключительно лесопокрытая площадь, характеризующаяся наличием основных лесообразующих пород. Площади, покрытые преимущественно кустарниками, в расчет не принимались и были исключены из оценки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены площади по возрастным группам и типам хозяйства. Как видно по данным государственного лесного реестра, имеет место динамика площадей, связанная с постепенным переводом древостоев в различные возрастные категории по данным лесного учета, а также с текущей деятельностью по рубкам и соответствующему лесовосстановлению, обеспечивающему поддержание породного и возрастного состава в долгосрочной перспективе.

Таблица 1. Площадь лесов по типам хозяйств, по годам, по возрастному составу, тыс. га, Забайкальский край

Table 1. Forest area by type of farms, by year by, age composition, thousand hectares, Transbaikal Area

Год, тип хозяйства	Всего	в том числе			
		молодняки	средневозрастные	приспевающие	спелые и перестойные
2005 г.					
хв хоз*	18596,5	3207,5	5426,8	2222,4	7739,8
мгл хоз**	4883,3	1462,1	2520,6	398,5	502,1
твл хоз***	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Итого	23479,8	4669,6	7947,4	2620,9	8241,9

Таблица 1. Продолжение

Год, тип хозяйства	Всего	в том числе			
		молодняки	средневозрастные	приспевающие	спелые и перестойные
2010 г.					
хв хоз	19303,2	3458,4	5224,2	2153,7	8466,9
мгл хоз	5644,7	1493,4	2983,0	478,2	690,1
твл хоз	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Итого	24947,9	4951,8	8207,2	2631,9	9157,0
2016 г.					
хв хоз	20313,6	3612,9	5525,3	2278,1	8897,4
мгл хоз	5773,0	1540,5	3034,7	488,5	709,2
твл хоз	0,6	0,5	0,1	0,0	0,0
Итого	26087,2	5153,9	8560,1	2766,6	9606,6
2021 г.					
хв хоз	19341,4	3719,2	5147,2	2076,7	8398,3
мгл хоз	5670,8	1651,8	2875,5	455,9	687,6
твл хоз	0,5	0,4	0,1	0	0
Итого	25012,7	5371,4	8022,8	2532,6	9085,9

* хв хоз — хвойное хозяйство;

** мгл хоз — мягколиственное хозяйство;

*** твл хоз — твердолиственное хозяйство.

Подобные данные и их динамика дают возможность получить примерную оценку поглощения углекислого газа растущими древостоями (табл. 2).

Таблица 2. Величина годичного поглощения CO₂ лесами по типам хозяйств, по годам, по возрастному составу, тыс. тонн CO₂, Забайкальский край

Table 2. The value of annual CO₂ absorption by forests by type of farms, by year by age composition, thousand tons of CO₂, Transbaikial Area

Год, тип хозяйства	Всего	в том числе			
		молодняки	средневозрастные	приспевающие	спелые и перестойные
2005 г.					
хв хоз*	55920,5	10989,9	19595,5	6440,4	18894,7
мгл хоз**	13003,1	2788,2	8120,3	1161,4	933,1
твл хоз***	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Итого	68923,6	13778,2	27715,9	7601,8	19827,8
2010 г.					
хв хоз	57624,5	11849,6	18864,0	6241,3	20669,7
мгл хоз	15134,1	2847,9	9610,0	1393,7	1282,5
твл хоз	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Итого	72758,6	14697,5	28473,9	7634,9	21952,2
2016 г.					
хв хоз	60652,3	12378,8	19951,0	6601,7	21720,7
мгл хоз	15456,2	2937,8	9776,7	1423,7	1318,1

Таблица 2. Продолжение

Год, тип хозяйства	Всего	в том числе			
		молодняки	средневозрастные	приспевающие	спелые и перестойные
Твл хоз	4,3	3,9	0,4	0,0	0,0
Итого	76108,5	15316,6	29727,7	8025,4	23038,8
2021 г.					
хв хоз	57849,4	12743,2	18585,9	6018,1	20502,2
мгл хоз	15020,2	3150,0	9263,7	1328,7	1277,9
твл хоз	3,6	3,1	0,5	0,0	0,0
Итого	72869,7	15893,2	27849,6	7346,8	21780,1

* хв хоз — хвойное хозяйство;

** мгл хоз — мягколиственное хозяйство;

*** твл хоз — твердолиственное хозяйство.

Анализ динамики накопления углерода в биомассе по типам лесных насаждений Забайкальского края показывает, что за период с 2005 по 2021 гг. поглощение CO_2 хвойными лесами выросло с 55920,5 тыс. тонн в 2005 году до 57849,4 тыс. тонн в 2021 году. Абсолютный прирост составил 1928,9 тыс. тонн, что в относительном выражении составило 3,5%.

В свою очередь поглощение CO_2 мягколиственными лесами выросло с 13003,1 тыс. тонн до 15020,2 тыс. тонн за этот период. Абсолютный прирост — 2017,1 тыс. тонн, относительный — 15,5%.

Данная динамика обусловлена изменением структуры насаждений как с точки зрения возрастного, так и породного состава. В частности, «замещением» гарей мягколиственными молодняками.

Сопоставление вклада различных возрастных групп лесов Забайкальского края в поглощение CO_2 показывает, что наибольшее количество CO_2 поглощают средневозрастные и спелые/перестойные леса (2021 год — 18585,9 и 20502,2 тыс. тонн соответственно).

Однако с точки зрения удельного показателя (на 1 га) наиболее эффективны молодняки и средневозрастные древостои.

Проведем анализ ассимиляционного потенциала национального парка «Чикой».

Таблица 3. Площадь лесов по типам хозяйств, по годам, по возрастному составу, тыс. га, 1999 г. территория национального парка «Чикой»

Table 3. Forest area by type of farms, by year, by age composition, thousand hectares, 1999, territory of the national park “Chikoy”

Тип хозяйства	Всего	в том числе			
		молодняки	средневозрастные	приспевающие	спелые и перестойные
хв хоз*	551,0	50,9	159,8	87,6	252,7
мгл хоз**	46,2	2,4	23,5	8,8	11,5
твл хоз***	0	0	0	0	0
итого	597,3	53,3	183,3	96,4	264,3

* хв хоз — хвойное хозяйство;

** мгл хоз — мягколиственное хозяйство;

*** твл хоз — твердолиственное хозяйство.

Таблица 4. Величина годичного поглощения CO₂ лесами по типам хозяйств, по годам, по возрастному составу, тыс. тонн CO₂, территория национального парка «Чикой»

Table 4. The value of annual CO₂ uptake by forests by type of farms, by year, by age composition, thousand tons of CO₂, the territory of the national park “Chikoy”

Тип хозяйства	Всего	в том числе			
		молодняки	средневозрастные	приспевающие	спелые и перестойные
хв хоз*	1622,20	174,35	576,88	253,97	616,99
мгл хоз**	127,37	4,60	75,77	25,56	21,43
твл хоз***	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ИТОГО	1749,57	178,95	652,66	279,54	638,43

* хв хоз — хвойное хозяйство;

** мгл хоз — мягколиственное хозяйство;

*** твл хоз — твердолиственное хозяйство.

Как видно из таблицы, поглощение CO₂ лесами на территории национального парка «Чикой» в 1999 г. составляло 1,75 млн тонн в год. Основной вклад также вносят хвойные леса — 1,62 млн тонн CO₂ в год.

В возрастной структуре поглощения CO₂ преобладает доля «средневозрастных» и «спелых и перестойных» в силу структуры площадей. Однако с точки зрения коэффициентов прироста, спелые и перестойные не дают столь существенного вклада, как остальные возрастные группы.

Проведем сравнение «эффективной» площади территории национального парка с точки зрения поглощения углекислого газа и сопоставим с аналогичными расчетами по Забайкальскому краю в целом.

В расчеты принималась исключительно лесопокрытая площадь, характеризующаяся наличием основных лесообразующих пород, что при сопоставлении с данными общей площади земель лесного фонда в целом (в частности по Забайкальскому краю), приведет к их несовпадению. Так, по данным государственного лесного реестра на 2021 г., лесопокрытая площадь, соответствующая всем группам леса по всем типам хозяйств в Забайкальском крае, составляет 25,01 млн га (табл. 1), что отличается от общей площади земель лесного фонда — 32,6 млн га.

В расчет при оценке годичного поглощения углерода принимались только растущие древостои, соответствующие основным лесообразующим породам и возрастным группам.

Таблица 5. Соотношение площади Национального парка «Чикой» и Забайкальского края, содержащей основные лесообразующие породы, обеспечивающие поглощение углекислого газа, тыс. га

Table 5. The ratio of the area of the National Park “Chikoy” and of the area of the Trans-Baikal Territory, the forested area containing the main forest-forming rocks that ensure the absorption of carbon dioxide, thousand hectares

Показатель	Национальный парк «Чикой»	Забайкальский край
Площадь всего	666,5	43190
Площадь лесопокрытая	597,3	25012
Процент лесопокрытой площади в общей площади	89,6	57,9

Как видно из полученных данных, леса национального парка «Чикой» отличаются более высокой долей покрытых лесом земель (почти 90% против 58% в среднем по краю), что обеспечивает более высокую эффективность поглощения лесами национального парка CO_2 на единицу площади.

Проведенная оценка поглотительной способности лесов Забайкальского края и национального парка «Чикой» показала их существенное значение для связывания атмосферного углерода.

Оценим эффективность поглощающей способности с позиции среднего объема поглощения CO_2 на единицу лесопокрытой площади (табл. 6).

Таблица 6. Средний объем поглощения CO_2 одним гектаром лесопокрытой площади, тонн $\text{CO}_2/\text{га}$

Table 6. The average volume of CO_2 absorption per hectare of forested area, tons of CO_2/ha

Тип хозяйства	Забайкальский край в целом			Национальный Парк «Чикой»		
	Объем поглощения, тыс. тонн CO_2	Лесопокрытая площадь края, тыс. га	Средний объем поглощения, тонн $\text{CO}_2/\text{га}$	Объем поглощения, тыс. тонн CO_2	Лесопокрытая площадь Парка, тыс. га.	Средний объем поглощения, тонн $\text{CO}_2/\text{га}$
хв хоз*	57849,4	19341,4	2,99	1622,2	551	2,94
мгл хоз**	15020,2	5670,8	2,65	127,37	46,2	2,76
твл хоз***	3,6	0,5	7,20	0	0	—
Итого	72869,7	25012,7	2,91	1749,57	597,3	2,93

* хв хоз — хвойное хозяйство;

** мгл хоз — мягколиственное хозяйство;

*** твл хоз — твердолиственное хозяйство.

На основе расчетных данных, представленных в таблице 6, видно, что средний объем накопления углерода в биомассе на единицу лесопокрытой площади в Забайкальском крае и национальном парке «Чикой» очень близок: 2,91 и 2,93 тонн $\text{CO}_2/\text{га}$ соответственно. В свою очередь, хвойные леса по сравнению с мягколиственными демонстрируют наибольшую эффективность накопления углерода в биомассе как в Забайкальском крае, так и в национальном парке «Чикой» (2,99 и 2,94 тонн $\text{CO}_2/\text{га}$ соответственно).

ОБСУЖДЕНИЕ

В целом, по Забайкальскому краю ежегодное поглощение CO_2 лесами составляет порядка 70–75 млн тонн. Преобладающий вклад вносят хвойные леса (60–65 млн тонн/год). На долю мягколиственных приходится 15–16 млн тонн CO_2 в год.

Наиболее эффективными с точки зрения удельного поглощения CO_2 являются молодняки и средневозрастные древостои. Однако из-за больших площадей, занимаемых приспевающими и спелыми лесами, именно они обеспечивают основной объем секвестрации углерода в абсолютном выражении.

Леса ООПТ, в частности национального парка «Чикой», фактически характеризуются такими же удельными показателями поглощения CO_2 на единицу площади, как и леса края в целом. Однако территория ООПТ характеризуется меньшим про-

центом горимости и с точки зрения баланса углерода бóльшим вкладом в поглощении углекислого газа.

За период с 2005 по 2021 гг. наблюдался рост поглощения CO_2 как хвойными, так и мягколиственными лесами. Данная динамика обусловлена изменением структуры насаждений вследствие естественных процессов, а также процессов искусственного лесовосстановления на пройденных пожарами территориях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать ряд важных выводов о роли лесов Забайкальского края и национального парка «Чикой» в поглощении атмосферного углерода.

С позиций масштаба ежегодное поглощение CO_2 лесами Забайкальского края составляет значительную величину – порядка 70–75 млн тонн. Это подчеркивает ключевую роль региональных лесных экосистем в глобальном углеродном цикле.

Роль хвойных лесов, с учетом преобладающего вклада в поглощении CO_2 (60–65 млн тонн/год), указывает на их особую ценность с точки зрения климатической политики и необходимость их сохранения.

Несмотря на то, что молодняки и средневозрастные древостои наиболее эффективны в удельном поглощении CO_2 , припевающие и спелые леса обеспечивают основной объем секвестрации углерода из-за занимаемых ими больших площадей. В данном случае мы не рассматриваем и не делаем упор на иные экосистемные составляющие, обеспечивающие экосистемную устойчивость.

Леса национального парка «Чикой» демонстрируют схожую эффективность накопления углерода в биомассе на единицу площади с лесами края в целом. Однако более высокая доля лесопокрываемых земель в национальном парке (90% против 58% в среднем по краю) обеспечивает более высокую эффективность накопления углерода в биомассе на единицу общей площади.

Территории ООПТ, в частности национального парка «Чикой», характеризуются меньшим процентом горимости, что повышает их значимость с точки зрения баланса углерода.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости расширения площади особо охраняемых территорий и обеспечения рационального лесопользования для сохранения функции лесов Забайкалья как важного естественного механизма поглощения парниковых газов [Брезгин В.С., Глазырина И.П., 2023]. Это имеет особое значение в условиях глобальных климатических изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брезгин В.С., Глазырина И.П. Углеродный баланс региона и климатическая политика // ЭКО. 2023. № 11. С. 25–42. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2023-11-25-42>
2. Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И., Титов С.П., Уткин А.И., Голуб А.А., Замолдчиков Д.Г., Пряжников А.А. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М.: Центр экологической политики России, 1995.
3. Пыжжева Ю.И., Пыжжев А.И., Зандер Е.В. Перспективы решения проблемы загрязнения атмосферного воздуха регионов России // Экономический анализ: теория и практика. 2019. Т. 18. № 3 (486). С. 496–513. <https://doi.org/10.24891/ea.18.3.496>
4. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepachenko D. G. Boreal forest health and global change // Science. 2015. V. 349. Iss. 6250. P. 819–822

5. Giasson L-A., Thiffault E., Lebel L. and Carle J-F. (2023) Carbon balance of forest management and wood production in the boreal forest of Quebec (Canada). *Front. For. Glob. Change*. 6:1242218. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1242218>
6. Röhling S., Dunger K., Kändler G. et al. Comparison of calculation methods for estimating annual carbon stock change in German forests under forest management in the German greenhouse gas inventory. *Carbon Balance Manage* 11, 12 (2016). <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0053-x>

Carbon Assimilation by Forests as an Ecosystem Service: Quantitative Assessment on the Example of the Trans-Baikal Territory and the Chikoy National Park

V. S. Brezgin ^{a,*}, G. M. Agafonov ^{b,**}

^a *Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia*

^b *National Park “Chikoy”*

* *E-mail: monmanage@bk.ru*

** *E-mail: agmles51@gmail.com*

Abstract. The article presents the results of assessing the role of the forests of the Trans-Baikal Territory and the National Park “Chikoy” in the absorption of atmospheric carbon. The calculations were performed based on the data of the state forest registry on the species and age composition of forest stands for 2005–2021 using a technique that takes into account growth coefficients. The obtained quantitative estimates of the role of the region’s forests in carbon sequestration confirm the need to expand the area of protected areas and ensure sustainable forest management in order to preserve this ecosystem function of the forests of Transbaikalia.

Keywords: CO₂, carbon dioxide, carbon dioxide emissions, greenhouse gas absorption, assimilation potential, Zabaykalsky Krai, climate policy, Chikoy National Park

REFERENCES

1. Brezgin V.S., Glazyrina I.P. (2023). Regional Carbon Balance and Climate Policy. *ECO*. No. 11. Pp. 25–42. (in Russ.). <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2023-11-25-42>
2. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepachenko D. G. Boreal forest health and global change // *Science*. 2015. V. 349. Iss. 6250. P. 819–822.
3. Giasson L-A. Thiffault E. Lebel L. and Carle J-F. (2023) Carbon balance of forest management and wood production in the boreal forest of Quebec (Canada). *Front. For. Glob. Change*. 6:1242218. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1242218>
4. Isaev A.S., Korovin G.N., Sukhikh V.I., Titov S.P., Utkin A.I., Golub A.A., Zamolodchikov D.G., Pryazhnikov A.A. (1995). *Ecological issues of carbon dioxide absorption through afforestation and reforestation in Russia*. Moscow: Center for Environmental Policy of Russia. (in Russ.)
5. Pyzheva Yu.I., Pyzhev A.I., Zander E.V. (2019). Prospects for solving the problem of atmospheric air pollution in Russian regions. *Economic Analysis: Theory and Practice*. Vol. 18. No. 3 (486). Pp. 496–513. (in Russ.). <https://doi.org/10.24891/ea.18.3.496>
6. Röhling S., Dunger K., Kändler G. et al. Comparison of calculation methods for estimating annual carbon stock change in German forests under forest management in the German greenhouse gas inventory. *Carbon Balance Manage* 11, 12 (2016). <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0053-x>

УДК 911.2:51–7(571.53-55)

ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГЕОСИСТЕМ БАЙКАЛЬСКОЙ СИБИРИ

А. К. Черкашин*, А. А. Фролов**

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

**E-mail: akcherk@irmok.net*

***E-mail: f-v1984@mail.ru*

Теоретически и статистически исследована дискретная пространственно-временная изменчивость характеристик геосистем регионального уровня (геомов) территории Байкальской Сибири. Использовались понятия и уравнения единой квантовой теории, направленной на дробное описание процессов и явлений в терминах функционального состояния геомов в гильбертовом пространстве суперпозиции функций высотного распределения геосистем. Частотные распределения по грациям высоты определялись на основе совмещения электронной карты геомов и цифровой модели рельефа. Геомы различаются по модальным значениям высоты, соответствующим их наибольшей встречаемости — оптимальным условиям существования на территории. Распределения преобразуются в показатели интегрированной опасности, которые статистически пересчитываются в информационные функции сквозной квантовой теории. Коэффициенты изменчивости этих функций по высоте местоположения квантуются, различаются по геомам, что подтверждается результатами теоретического анализа. Построена карта квантовых уровней пространственно-временной изменчивости геомов Байкальской Сибири и схема пространственно-временных переходов между квантовыми уровнями (геомами). Обосновываются методы прогнозирования динамики и эволюции геосистем и предлагаются новые процедуры расчета квантовой изменчивости временного и пространственного положения геомов.

Ключевые слова: единая квантовая теория, функциональный анализ, пространственно-временная изменчивость, дискретные состояния геомов, цифровая модель рельефа, Байкальская Сибирь

DOI: 10.31857/S0869607124030044, EDN: LLSLRG

ВВЕДЕНИЕ

География призвана объяснять и обеспечивать возможность понимания особенностей самых сложных, сочетанных процессов и явлений, происходящих на Земле, что требует использования адекватных исследовательских инструментов, моделей и методов описания и прогнозирования изменений. Особенно это важно в современных условиях нарастания климатического и антропогенного влияния на природную, ландшафтную среду. Изменения в ландшафтах могут быть медленными или быстрыми, они носят качественный, необратимый, эволюционный характер, или напротив — обратимы и периодически повторяются. Все разнообразие изменений

в геосистемах объединяется в одно понятие «пространственно-временная изменчивость», которая рассматривается как сложное свойство географических систем.

Основной целью исследования эволюции структуры географических систем давно является решение проблемы, как характеристики разных мест меняются с течением времени в результате процессов региональной конвергенции и дивергенции, для чего разрабатываются соответствующие модели [33–34]. Структуризация географического пространства основана на его представлении в виде множества геоструктур различных типов с выделением нескольких осей измерений и их сопряжений: компонентных, пространственных, межкомпонентных связей, рубежей и границ и т. д. [2]. Этому способствует использование вычислительных средств (компьютеров), геоинформационных систем (ГИС) и аналитических методов сетевых моделей для решения реальных задач в широком спектре прикладных областей [35]. Пространственно-временные подходы представляют собой набор концепций, методов и процедур, направленных на представление и понимание эволюции природных и общественных явлений в пространстве через описание территориальных объектов, их атрибутов, их отношений и процессов изменения средствами моделирования и расчета пространственно-временных индикаторов [39]. В исследованиях учитывается роль межкомпонентных взаимодействий в ходе изменений, что требует целостного мышления и привлечения моделей нелинейной динамики, а ключевой темой становится изучение эволюционных тенденций как вероятностных процессов [40].

В настоящее время накоплен значительный опыт исследования, моделирования и прогнозирования текущей изменчивости геосистем. Предлагаются различные модели и методы изучения изменений ландшафтов. При этом используются разные комплексные показатели изменчивости, рассчитанные на основе временной серии данных ДЗЗ с применением ГИС-технологий [4, 11, 22, 42], статистических моделей связи свойств и характеристик ландшафтов [36], идей теории графов и теории случайных процессов [3, 41].

В модели опустынивания и восстановления Черных земель Прикаспия [4, 42] с помощью дифференциальных уравнений описывался процесс смены состояний участков территории – переход земель из одной стадии антропогенной деградации в последующую и обратно направленное восстановление. Преимуществом модели является описание в обобщенных показателях (площадь земель в разных состояниях) процесса опустынивания; факторное влияние учитывается через коэффициенты интенсивности процессов смены состояний. Модель получила развитие в дальнейших исследованиях [12, 16], где она используется для математического моделирования динамики и прогнозирования эволюции аридных ландшафтов.

В работах Э.Г. Коломыца [7–10] предлагается метод прогнозирования изменения ландшафтной структуры на фоне колебания климата. Метод основан на представлении об «экологических нишах» – кривых возможных состояний ландшафта в пространстве климатических показателей (факторов), – на результатах информационно-статистического анализа, оценках климатических изменений, применении ориентированных графов и вероятностных цепей Маркова. Такой набор средств реализует функционально-динамический и отчасти структурно-генетический подход к формированию прогноза.

Для оценки глобальной реакции растительности на изменение климата широко используются биоклиматические ординационные схемы – графические изображения области встречаемости растительных сообществ и иных компонентов геосис-

тем в координатах климатических факторов [6]. В частности, в исследовании [14] прогноз состояния лесного покрова Сибири основан на использовании ординационных моделей, отражающих изменение породного состава лесов в пространстве биоклиматических воздействий. На основе этих моделей появляется возможность прогнозировать изменения лесорастительного потенциала каждого участка территории при разных климатических сценариях. В статье [5] сделаны оценки возможных изменений ареалов зональных фитоценозов потенциальной растительности равнинных территорий России в связи с увеличением среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°C. Экофизиологический подход к прогнозированию позволяет отразить смену разнообразия растительного покрова вдоль биоклиматических градиентов [37].

В рамках исследования временной изменчивости геосистем нами разрабатывались и реализовывались методы и алгоритмы прогнозного картографирования климатогенных трансформаций геосистем на разных иерархических уровнях: 1) картографирование изменений геомной структуры (региональный уровень) территории Предбайкалья при климатических колебаниях [18, 19]; 2) проведение геоинформационно-картографического анализа трансформаций геосистем ранга групп фаций (топологический уровень) с использованием модели клеточного автомата [20–21]. В первом случае основанием для прогноза послужили выявленные пространственно-временные и классификационные связи геомов, характерные высоты расположения каждого геомы и структуры размещения выделов геомов по высоте, а во втором — характер локального окружения (соседства) выделов фаций, отражающий особенности их взаимодействия, площадь и длина границ каждого исследуемого выдела, средняя высота над уровнем моря расположения каждого выдела и модальное значение распределения площади геосистем разных групп фаций в регионе по высоте местоположения. Исследование, моделирование и прогнозирование проводятся по градиентам высоты местоположения геосистем, когда высота рассматривается в качестве комплексного показателя состояния среды, что оправдано для горных территорий с выраженной высотной поясностью.

Каждый подход к моделированию и прогнозированию имеет свои особенности и специфическую сложность реализации при обработке данных, в связи с чем возникает необходимость в развитии объединяющей, целостной, системной методологии решения задач моделирования изменчивости в терминах единой квантовой теории.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Выделены две формы проявления временной дискретной (со сменой инварианта, типа геосистемы) и непрерывной (без смены инварианта) изменчивости геосистем в зависимости от влияния природных и природно-антропогенных факторов. К непрерывной временной изменчивости относятся различные формы природной и антропогенной динамики геосистем, а к дискретной — качественная трансформация, эволюция геосистем [17]. Примером глубокой трансформации являются процессы и явления географического цикла, выражающиеся в последовательной смене ландшафтов под действием эндогенных и экзогенных сил, в тектоническом поднятии и эрозионном выравнивании рельефа.

С целью анализа дискретных форм пространственно-временной изменчивости используется квантово-географический подход, при котором дискретные свойства геосистем рассматриваются с позиции единой, сквозной квантовой (К) теории как раздела функционального математического анализа для количественного описания

дробности и целостности природных и общественных систем. Используются процедуры тривиальных и главных расслоений дифференциальной геометрии и функционального анализа виртуальных внутренних пространств геосистем (геомеров и геохор). Преимущество К-описания заключается в линейной простоте уравнений и формул, отражающих как типовые функции дискретно-квантовых состояний геосистем, так и суперпозицию этих состояний, реализуемую в наблюдаемых пространственных закономерностях в природе и обществе. Такой подход становится результатом восхождения от простого понимания географических объектов как систем непрерывной связи элементов к выделению независимых дискретных слоев самостоятельного функционирования (геомеров), их полисистемной эквивалентности в геохорах и внутрирайонной целостности. Для количественного анализа картографических данных применяются методы теории надежности, основанные на частотных распределениях площадей геомеров по высоте, на расчете показателей надежности и безопасности [26–27].

Для К-моделирования используется методология расслоения дискретных множеств и непрерывных пространств [31, 23–26], основанная на идеях дифференциальной геометрии. В публикациях обсуждается возможность использования К-теории для моделирования географических полей в терминах расслоения пространства для классификации и выделения границ географических районов [29–30] по схеме Б. З. Илиева [38] формулировки нерелятивистской квантовой механики, где векторные расслоенные пространства являются гильбертовыми. Ставится задача сквозным образом распространить эволюционные понятия и модели К-теории на явления различного рода и масштаба.

Касательное расслоение $\Omega = (X, \pi, M, F)$ многомерного пространства-времени $(t, x) \in X, x = \{x_j\}$ над многообразием $M(t, x)$, заданным гладкой поверхностью функции состояния геосистемы $F(t, x)$ в точках $x_0 = \{x_{0j}\}$ (рис. 1а) в начальный момент $t = 0$ – это отображение $\pi: X(t, x) \rightarrow M(0, x_0)$, обратное которому $\pi^{-1}: M(0, x_0) \rightarrow X(t, x)$ представляет пространство X в виде расслоенного тривиального пространства $M \times F$; F – типовой (абстрактный) слой, похожий $F \leftrightarrow F_j$ на все остальные j -е касательные слои-гиперплоскости F_j расслоения $F = \{F_j(t, x)\}$ (рис. 1б). Результат расслоения Ω напоминает атлас $F = \{F_j\}$ отображения окрестностей различных пунктов $x = x_{0j}$ поверхности $F(t, x)$ земной сферы на плоские карты $F_j(t, x)$ с общей легендой их содержания, определяющего тематическое сходство карт. Другой вариант расслоения $M \times F$ – дифференциация территории X на ареалы геосистем F_j разного типа $F = \{F_j\}$ (геомеры) согласно легенде M . Важно, что каждый слой F_j может рассматриваться как координата многомерного пространства $F = \{F_j\}$, в котором сложная система представляет собой вектор-сочетание разных координат, отражающий положение системы в этом пространстве, например, характеризует геохору F списком геомеров $F = \{F_j\}$ (рис. 1б) в ландшафте $X(t, x)$ с учетом их встречаемости p_j . Каждый касательный слой $F_j(t, x)$ параметризуется набором координат $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ точки касания поверхности геосистемной связи $F(t, x_{0j})$ – дискретного многообразия $M(0, x_{0j})$ (рис. 1а).

Касательная плоскость (слой расслоения) $F_j(t, x)$ хорошо описывает функцию $F(t, x)$ в окрестности точки касания $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ билинейным уравнением [25], в данном случае

$$F_j(t, x) = v_j t + a_j \cdot y_j + F_{0j}, a_j \cdot y_j = \sum_i a_{ij} y_i, \\ a_{ij} = \frac{\partial F_j(t, x)}{\partial x_i} = \frac{\partial f_j(t, y)}{\partial y_{ij}}, v_j = \frac{\partial F_j(t, x)}{\partial t}, \quad (1)$$

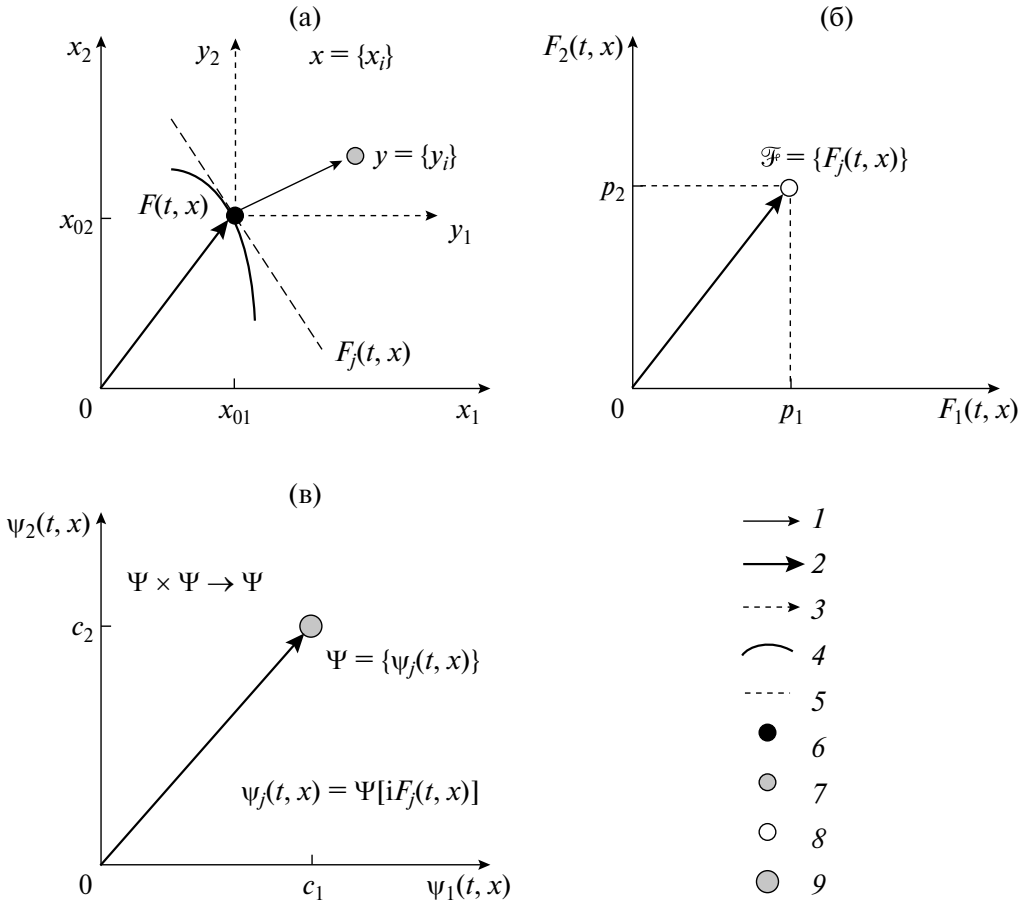


Рис. 1. Поэтапное а-в совершенствование пространственно-временного анализа: а – двухмерное факторное пространство $x = \{x_i\} \in X(t, x)$; б – представление расслоенного пространства в виде вектор-функции $F = \{F_j(t, x)\}$; в – функциональное, гильбертово пространство $\Psi = \{\psi_j(t, x)\}$ суперпозиции функций вида (3). Условные обозначения: 1 – оси координат переменных и функций; 2 – векторы различных форм (радиус-вектор, вектор-функция, суперпозиция функций); 3 – локальные координаты $y = \{y_i\}$; 4 – кривая или поверхность функции многообразия $F(t, x)$; 5 – линия (луч, плоскость) $F_j(t, x)$, касательная в точке x_0 . Состояния системы: 6 – в точке $F(t, x_0)$; 7 – в локальной системе координат $y = \{y_i\}$; 8 – в виде вектор-функции с весами p ; 9 – в форме суперпозиции Ψ -функций с весами c .

Fig. 1. Step-by-step improvement of spatial and temporal analysis: а is a two-dimensional factor space $x = \{x_i\} \in X(t, x)$; б is a representation of a fiber bundle in the form of a vector-function $F = \{F_j(t, x)\}$; в is a Hilbert functional space $\Psi = \{\psi_j(t, x)\}$ as superposition of functions of the form (3). Symbols: 1 – coordinate axes of variables and functions; 2 – vectors of various shapes (radius-vector, vector-function, superposition of Hilbert functions); 3 – local coordinates $y = \{y_i\}$; 4 – curve or surface of a function $F(t, x)$ of a manifold M ; 5 – line (ray, plane) $F_j(t, x)$, tangent at point x_0 . The states of the system: 6 – at the point $F(t, x_0)$; 7 – in the local coordinate system $y = \{y_i\}$; 8 – in the form of a vector-function with weight vector $p = \{p_j\}$; 9 – in the form of a superposition of Ψ -functions with weight vector $c = \{c_j\}$.

где $a_j y_j$ – скалярное произведение двух векторов $y_j = \{y_{ij}\}$ и $a_j = \{a_{ij}\}$; v_j – скорость изменения $F_j(t, x)$; a_j – показатели чувствительности изменения $F_j(t, x)$ к влиянию факторов y_j ; $f_j(t, y) = F_j(t, x) - F_{0j} = v_j t + a_j y_j$, $F_{0j} = F_j(0, x_{0j})$. Под $y_j = x - x_{0j}$ будем понимать относительную величину – разницу высоты x местоположения участка ландшафта в рельефе и модального значения высоты $x = x_{0j}$, соответствующего максимуму частотного распределения площадей геомера j -го типа, в границах ареала которого находится этот участок.

Функция типового слоя $f(t, y)$ (без j) задается в относительных координатах $y = x - x_{0j}$, в показателях отклонения от нормы x_0 – точки касания слоем системной функции $F(t, x)$ в позиции $F_0 = F(t, x_0)$ (см. рис. 1а). В относительных показателях y и $f(t, y)$ функции разных слоев $f_j(t, y)$ имеют эквивалентные выражения, сопоставимые с точностью до преобразований $f_j(t, y) \rightarrow f_i(t, y) = v_i t + a_i y$. Функции $F_j(t, y)$ и $f_j(t, y)$ далее считаются безразмерными, для чего они мысленно домножаются на соответствующий постоянный коэффициент. При анализе проблемы удобно рассуждать в понятиях типового слоя, понимая при этом, что выводы аналогичным образом воспроизводятся в конкретных j -х слоях (геомерах).

При переходе к гильбертовым пространствам в расслоение Ω добавляются элементы группы Ψ (рис. 1б), действующие на себя $\Psi \times \Psi \rightarrow \Psi$, например, в виде функциональной надстройки над слоем $\Psi[iF_j(t, x)] = A \exp[iF_j(t, x)]$, где i – мнимая единица $i^2 = -1$. Координаты гильбертова пространства – это комплекснозначные независимые функции $\psi_j(t, x) = \Psi[iF_j(t, x)]$, групповые операции с которыми дают функции того же вида. Например, умножение на линейный унитарный оператор $U(t_2, t_1)$ функции К-состояния $\psi(t_1, x)$ переводит его в новое К-состояние $\psi(t_2, x) = U(t_2, t_1)\psi(t_1, x)$, благодаря чему отображается временная эволюция К-системы или ее изменение от места к месту.

Уравнение

$$\psi_j(t, x) = \Psi[iF_j(t, x)] = A \exp[iF_j(t, x)] = A \exp[i(v_j t + a_j y_j + F_{0j})] \quad (2)$$

в волновой оптике описывает изменения волновых полей $\psi_j(t, x)$ через амплитуду A и фазу $F_j(t, x)$ волны (эйконал), где $\omega = -v_j$ – угловая частота волны, $a_j = \omega \mathbf{n} / c$ – волновой вектор; $\mathbf{n}$ – единичный вектор в направлении распространения волны со скоростью c ; F_{0j} – фазовое смещение, индивидуальное для каждой точки x_{0j} пространства. Градиентный вектор $a_j = \text{grad} \psi_j$ определяет направление луча распространения фронта волны, поэтому градиент эйконала $F_j(t, x)$ направлен вдоль луча, что связывает волновую оптику с линейной. Лучи – это касательные линии к границе многообразия, известного в геометрической оптике как каустика, т.е. огибающая лучи поверхность (см. рис. 1а). В географии она трактуется как среда реализации разных причинно-следственных связей [32].

При учете фазового смещения F_{0j} , когда $f_j(t, y) = F_j(t, x) - F_{0j} = v_j t + a_j y$ волновая функция приобретают вид, не зависящий от локальных условий, инвариантный относительно фазы $F_j(t, x) - F_{0j}$. В физике поля функции, обеспечивающие инвариантность поля $\psi_j(t, y) = A \exp[i f_j(t, y)]$ относительно фазовых преобразований $\exp[i F_{0j}]$, называются калибровочными полями (космическим ландшафтом): $\psi_j(t, x) = A \exp[i f_j(t, y)] \exp[i F_{0j}]$; $\exp[i F_{0j}]$ – унитарный оператор внутреннего пространства, переводящий универсальный закон $\psi_j(t, y) = A \exp[i f_j(t, y)]$ в локальную закономерность $\psi_j(t, x) \rightarrow \psi_j(t, y) \exp[i F_{0j}]$ путем сдвига значения эйконала на величину F_{0j} : $F_j(t, x) = f_j(t, y) + F_{0j}$. Здесь наблюдается прямая аналогия с полем географической среды, которое действует локально, и его учет в закономерностях связи процессов и явлений приводит к универсальным законам, не зависящим от средового пара-

метра $F_0: f_j(t, y) = F_j(t, x) - F_0$. Прослеживается наглядная связь касательной функции слоя $F_j(t, x)$ с координатой гильбертова пространства $\psi_j(t, x) = \Psi[iF_j(t, x)]$ (см. рис. 1 б, в), что формализуется через соответствие тривиального и главного расслоений [26].

К-состояние геосистемы $|\psi_j\rangle$ соответствует функции ψ_j дискретного типа (2) геосистемы j (типу геомера). Чистое К-состояние математически может быть описано волновой функцией (волновая механика), вектором состояния (матричная механика) или полным набором К-чисел, например, для химических элементов, определяющих их положение в периодической системе Д. И. Менделеева. Функцию $\psi_j(t, y)$ времени t и координат y по аналогии с волновой функцией в квантовой механике будем называть геоинформационной Ψ -функцией. Состояние неоднородной геосистемы (геохоры, полисистемы) определяется суперпозицией К-состояний (векторов) входящих в нее m геомеров (см. рис. 1в)

$$\Psi = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + \dots + c_j|\psi_j\rangle + \dots + c_m|\psi_m\rangle, \quad (3)$$

где c_j – постоянные весовые коэффициенты, квадрат модуля $p_j = |c_j|^2$ которых соответствует возможности встретить на территории геосистему j -го типа (доля площади ареалов j -го геомера). Состояние $|\psi_j\rangle$ и $c_j|\psi_j\rangle$ считается одним и тем же К-состоянием. Наблюдаемая пространственная структура территориального образования соответственно отображается формулой

$$P = p_1P_1(t, y) + p_2P_2(t, y) + \dots + p_jP_j(t, y) + \dots + p_mP_m(t, y), \quad P_j(t, y) = P\langle\psi_j|\psi_j\rangle, \quad (4)$$

где $\psi_j^* = \langle\psi_j|$ – сопряженное к $|\psi_j\rangle$ состояние такое, что $\phi_j = \langle\psi_j|\psi_j\rangle = \|\psi_j\|^2$ – квадрат модуля функции ψ_j . Величина $P_j(t, y) = P\langle\psi_j|\psi_j\rangle = P(\psi_j^*\psi_j(t, y))$ соответствует изменяющемуся во времени распределению доли площади j -го геомера по географической характеристике y . Оператор P преобразует $\langle\psi_j|\psi_j\rangle \rightarrow P_j(t, y)$. В физической науке $P_j(t, y) = \langle\psi_j|\psi_j\rangle$. В географии это преобразование не прямое, а состоит, как следует из дальнейшего текста, из нескольких этапов.

Описание территориальной целостности с помощью Ψ -функции происходит в гильбертовом, функциональном пространстве комплекснозначных функций вида

$$\psi_j(t, y) = \psi_0\psi_y(t)\psi_{xy}(y) = \psi_0 \exp[(\lambda + \lambda_0 i)t] \cdot \exp[(\alpha + \alpha_0 i)y], \quad (5)$$

где $\alpha, \alpha_0, \lambda, \lambda_0$ – действительные константы; ψ_0 – амплитуда изменений, которую можно принять за единицу; $j = 1, 2, \dots, m$ – номер координаты $|\psi_j(t, y)\rangle$; сопряженная $\psi_j(t, y)$ функция $\psi_j^*(t, y) = \exp[(\lambda - \lambda_0 i)t] \cdot \exp[(\alpha - \alpha_0 i)y]$. В данном случае квадрат модуля $\psi_j(t, y)$ – действительная величина вида:

$$\langle\psi_j|\psi_j\rangle = \psi_j(t, y) \cdot \psi_j^*(t, y) = \exp(2\lambda t) \cdot \exp(2\alpha y). \quad (6)$$

При $\lambda = v\alpha, \lambda_0 = v\alpha_0, \alpha_0 = \pm\alpha$ (v – скорость эволюционных изменений) (5) удовлетворяет [27] дифференциальному уравнению:

$$2i \frac{\partial^2 \Psi_j(t, y)}{\partial t^2} = \left(\frac{v}{\alpha}\right)^2 \frac{\partial^4 \Psi_j(t, y)}{\partial y^4}, \quad (7)$$

многие решения которого различаются по собственным значениям $\alpha = \alpha_j$:

$$\psi_j(t, y) = \psi_y(t)\psi_{xy}(y) = \exp[v\alpha_j(1+i)t] \exp[\alpha_j(1+i)y], \quad (8)$$

и состоят из наложения временной $\psi_y(t) = \exp[v\alpha_j(1+i)t]$ и пространственной составляющих $\psi_{xy}(y) = \exp[\alpha_j(1+i)y]$, удовлетворяющих соответственно дифференциальным уравнениям

$$a) i d^2 \psi_t(t)/dt^2 = -2(v\alpha)^2 \psi_t(t), \text{ б) } d^4 \psi_y(y)/dy^4 = -4\alpha^4 \psi_y(y). \quad (9)$$

Уравнение (7) аналогично линейному дифференциальному уравнению Шрёдингера, описывающему физическое изменение в пространстве и во времени чистого состояния, задаваемого волновой функцией, в гамильтоновых К-системах:

$$\mathbf{H}\Psi(t,x) = i\hbar \frac{\partial \Psi(t,y)}{\partial t} = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2 \Psi(t,y)}{\partial y^2}, \quad (10)$$

где m — масса частицы; $\hbar$ — приведенная постоянная Планка (постоянная Дирака), которая в теоретической физике для простоты и общности описания приравнивается к единице.

Эти равенства — функции Гамильтона — представляют собой полную энергию системы, выраженную через координаты и импульсы, а иногда также явно через время $\psi(t,y) = \psi_0 \exp(-iHt/\hbar)$, если $H = H$ не зависит от времени. Гамильтониан генерирует временную эволюцию К-состояний. Оператор $U = \exp(-iHt/\hbar)$ — это унитарный оператор временной эволюции замкнутой К-системы. Умножение Ψ -функции на U пролонгирует, смещает состояние системы во времени.

По аналогии с (10) геосистемный оператор энергии эволюции согласно (7) при $\hbar = 1$ будет иметь вид

$$\mathbf{H} = 2i \frac{\partial^2}{\partial t^2} = \left(\frac{v}{\alpha}\right)^2 \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (11)$$

Согласно (11) функция (5) $\psi_y(t) = \exp[(\lambda + \lambda_0 i)t]$ имеет собственные значения $\lambda + \lambda_0 i = \pm(1+i)v\alpha$, соответствующие взрывному росту (+) или затуханию (−) явлений во времени, например, в географическом цикле рельефообразования. Временные изменения $\psi_t(t)$ накладываются на существующую форму рельефа $\psi_y(y)$, что задается уравнением (5) с четырьмя собственными значениями $\alpha + \alpha_0 i = \pm(1\pm i)\alpha$ разного геоморфологического содержания (положительные и отрицательные формы рельефа, возвышения и скаты местности). Соотношение коэффициентов в уравнениях (10) и (11) имеют сходную размерность $[\hbar/m] = [v/\alpha] = \text{площадь/время}$, но отличаются масштабом величин. Согласно (9) и (11) собственное значение оператора $H = 2i[v\alpha(1+i)]^2 = -4(v\alpha)^2$ отрицательно определяется коэффициентами временной v и пространственной α изменчивости, так что при отсутствии изменений $v = 0$ или ровном рельефе $\alpha = 0$ энергия будет максимальной $H = 0$; в иных случаях энергия рельефа находится в «потенциальной яме» $H < 0$.

Для процесса в потенциальном поле V , эволюционный оператор смены К-состояний смещен на потенциал этого поля: $\hat{H} = H + V$. В случае простого гармонического осциллятора (упругого колебания вокруг центра) потенциал зависит от величины отклонения y_j от нормы: $V = k|a_j \cdot y_j|^2/2$, где k — коэффициент упругости; $|a_j \cdot y_j|^2 = \sum (a_{ij} y_{ij})^2$.

С учетом соотношения Эйлера $\exp(\pm i\alpha y) = \cos(\alpha y) \pm i \sin(\alpha y)$ общее решение уравнения (9б) при одной независимой переменной y будет иметь вид (C_1, C_2, C_{12}, C_{34} — константы):

$$\psi_y(y) = [C_1 \cos(\alpha y) + C_2 \sin(\alpha y)][C_{12} \exp(\alpha y) + C_{34} \exp(-\alpha y)].$$

Частное решение находится на интервале значений фактора $y \in [0, y_m]$, на концах которого $\psi_y(0) = A$, $\psi_y(y_m) = 0$. Отсюда $C_1(C_{12} + C_{34}) = A$, $\cos^2(\alpha y_m) = 0$, или $\cos^2(\alpha y_m) = (1/2)(\cos(2\alpha y_m) + 1) = 0$, или $\cos(2\alpha y_m) = -1$, т.е. $2\alpha y_m = \pi + \pi J$, где J — собственные числа решений уравнения (9б), каждое из которых соответствует типу гео-

системных функций $F_j(t, x), f_j(t, y), \psi_j(t, y)$ вида (8). Значение коэффициента α_j зависит от К-числа J и величины y_m интервала изменчивости и квантуется с шагом $\alpha_j = \pi/2y_m$. При этом $J = (\alpha y_m - \pi/2)/\pi$. При увеличении множества координат факторного пространства $x = \{x_j\}$ возрастает количество видов К-чисел. Квантованность через α_j переносится на другие географические константы, например, собственное значение эволюционного оператора $H_j = -4(\nu\alpha_j)^2$ имеет несколько энергетических уровней J .

Пространственно-временные Ψ -функции гильбертова пространства в общем случае имеют вид (8), а квадрат их модуля

$$\phi_j(t, y) = |\psi_j(t, y)|^2 = \exp[\beta_j(\nu t + y)], \beta_j = 2\alpha_j \quad (12)$$

указывает, как непосредственно наблюдаемая величина $\phi_j(t, y)$ изменяется за счет смещения величины аргумента y во времени: $y + \nu t$. Для применения аналитических средств К-теории необходимо найти пример экспоненциальной наблюдаемой в географических исследованиях. Такой Ψ -функцией может быть безразмерная вероятностная величина интегрированной опасности (ИО) в теории надежности [28].

Рассматривается случай стационарного распределения площадей ареалов геоморфов $P_j(x)$ (в долях от единицы) разного рода j по грациям высоты $x = y + x_{0j}$. Эта величина связана с мерой надежности системы $1 \geq P_j^*(x) \geq 0$, которая снижается с ростом высоты местоположения x , а надежность, в свою очередь, определяет значение ИО $E_j(x) \geq 0$ — вероятности системой не достигнуть состояния с характеристикой x :

$$P_j(x) = -\frac{dP_j^*(x)}{dx}, \quad E_j(x) = -\ln P_j^*(x). \quad (13)$$

Значение $E_j(x_{0j}) = 1$ выделяет границу $x = x_{0j}$ существования системы j , выше которой ее нахождение маловероятно.

Хорошую аппроксимацию функции надежности $P_j^*(x)$ дает функция распределения по закону Гумбеля $P_j^*(x) = \exp[-\exp(z_j)]$ [28]. Ее частным вариантом при $z_j = 2\alpha_j y = 2\alpha_j(x - x_{0k})$ является распределение Гомпертца, для которого мера опасности — экспоненциальная зависимость вида (12):

$$E_j(x) = -\ln P_j^*(x) = \exp(z_j) = \exp(\beta_j y) = \exp[\beta_j(x - x_{0k})]. \quad (14)$$

В этом случае функция плотности распределения

$$P_j(x) = \beta_j \exp[\beta_j(x - x_{0k})] \exp\{-\exp[\beta_j(x - x_{0k})]\} \quad (15)$$

имеет максимум при $x = x_{0j}$, что соответствует модальному значению x_{0j} распределения $P_j(x)$. Функция (15) отражает кривую экологической или геосистемной ниши, характеризующую вероятность нахождения объектов в регионе исследования по особенностям их реакции на влияние факторов x , величина которых для точности отражения закономерностей принимается в логарифмическом масштабе $x \rightarrow y = \ln(x/x_{0j})$, что позволяет перевести размерные переменные в относительные и безразмерные — центрировать и нормировать данные, а затем сравнивать их в системах различного рода. Аналогично реализуется переход к относительному (собственному) времени $t \rightarrow \tau = \ln(t/t_0)$ с учетом характерного времени t_0 , когда $\tau = 0$. Это позволяет использовать уравнения К-моделирования для описания процессов различной продолжительности. Во всех К-уравнениях переменные применяются типовым, линейным образом, понимая под ними результат нелинейного преобразования переменных. При статистической обработке данные заранее переводятся в логарифмическую шкалу.

ОБЪЕКТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой статье используются методы картометрии и сравнительно-географического и статистического анализа пространственных структур. В качестве объекта исследования выбраны геосистемы (геомы) территории Байкальской Сибири в административных границах Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края. Геом – это наименьшая типологическая и классификационная единица (геомер) региональной размерности, соответствующая ареалу проявления на территории разновидности типа природной среды (типа ландшафта) и объединяющая по иерархии ареалы классов фаций различных факторальных рядов. На территории исследования выделено 37 геомов, пронумерованных латинскими цифрами I–XXXVII по порядку $N = 1 \div 37$ (индексы $j, l \in N$) следования в легенде ландшафтной карты [13].

Территория расположена в центре материка Евразия в поясе умеренных широт. Горный и горно-равнинный характер рельефа определяет здесь суровые резкоконтинентальные и одновременно с этим разнообразные природно-климатические условия. Регион включает в себя оз. Байкал и примыкающие к нему регионы Предбайкалья и Забайкалья. В пределах региона соседствуют четыре физико-географические области: Южно-Сибирская горная, Байкало-Джугджурская горно-таежная, Средне-сибирская таежно-плоскогорная и Северо-Монгольская полупустынно-степная, которые отличаются своеобразием природно-ландшафтных условий и исторического развития, определяющих характер пространственно-временной изменчивости геосистем. Названные обстоятельства указывают на развитие в регионе Байкальской Сибири широкого спектра геосистем, относящихся к трем типам природной среды (гольцовой, таежной, степной), что объясняется высоким разнообразием природных условий, ландшафтообразующих факторов и процессов [1, 15].

Исходными данными при анализе пространственно-временной изменчивости послужили высотные параметры геосистем (характерные высоты расположения геомов, структуры размещения выделов геомов по высоте и др.). Для расчета использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) на базе фрагмента глобального покрытия SRTM с разрешением 3 угловых секунды. Расчет высотных характеристик осуществлен на основе электронного варианта карты «Ландшафты юга Восточной Сибири» [13] и цифровой модели рельефа (ЦМР) методом наложения данных: произведен оверлей ЦМР на сетку выделов геомов. Для этого ЦМР экспортировалась в векторный полигональный вид в программе QGIS, а затем в программе ArcView проводился совместный анализ векторного слоя ЦМР с векторной сеткой ландшафтных выделов, в результате чего получена матрица-таблица встречаемости площадей (в условных единицах) участков различных геомов по высоте. Затем в табличном виде в Excel эти площади объединялись $S_j(x)$ с шагом 100 м по высоте x и рассчитывались частотные доли $P_j(x) = S_j(x)/S_{0j}$ площади геомов (S_{0j} – суммарная площадь j -го геома на территории).

Далее, согласно (13), последовательно по грациям вычитая из 1 значения $P_j(x)$ до 0, находим величину надежности $P_j^*(x)$ для каждой высоты x местоположения и вычисляем меру опасности $E_j(x) = -\ln P_j^*(x)$ для каждого геома j (табл. 1). По соотношению (14), статистически исследуем зависимость $E_j(x)$ от высот x , а именно связь $E_j(x) = E_{0j} \exp[\beta_j(x - x_{0k})]$, для чего это равенство логарифмируем $\ln E_j(x) = \beta_j x - \beta_j x_{0k} + \ln E_{0j}$ и методом линейной регрессии определяем коэффициенты β_j и $\eta_j = -\beta_j x_{0j} + \ln E_{0j}$, откуда $x_{0j} = -(\eta_j - \ln E_{0j})/\beta_j$ для каждого геома. Вычисления проводились с использованием электронных таблиц программы Excel.

Табл. 1. Этапы преобразования данных распределения площадей $S_j(x)$ геоме IX ограниченного развития горнотаежных лиственничных лесов в Байкальской Сибири по грациям высоты X (интервал 100 м)

Table. 1. Stages of transformation of area distribution $S_j(x)$ of geome IX of limited developed mountain larch taiga in Baikal Siberia by height x (gradient step size 100 m)

$x, м$	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
$S_j(x)$	10	49	89	144	240	338	410	354	325	224	143	95	56	46	20
$P_j(x)$	0.004	0.019	0.034	0.056	0.093	0.131	0.159	0.137	0.126	0.087	0.055	0.037	0.022	0.018	0.008
$P^*_j(x)$	1.00	1.00	0.98	0.94	0.89	0.79	0.66	0.50	0.37	0.24	0.16	0.10	0.06	0.04	0.02
$E_j(x)$	0.00	0.00	0.02	0.06	0.12	0.23	0.41	0.68	1.00	1.42	1.86	2.30	2.76	3.18	3.73
$\ln E_j(x)$	—	-5.55	-3.77	-2.83	-2.12	-1.47	-0.89	-0.38	0.00	0.35	0.62	0.83	1.01	1.16	1.32

Определяется встречаемость $P_j(x)$ разных геомов j по высоте x (рис. 2а). По характеру распределения выделяются группы горных и подгорных геомов по расположению, величине максимальных значений и амплитуде варьирования по высоте. По кривым определяются модальные значения x_0 распределений, которые с шагом 400 метров подразделяются примерно на четыре К-уровня.

Статистически исследуется линеаризованная зависимость

$$\ln E_j(x) = \beta_j \ln x + \eta_j \tag{16}$$

ИО $E_j(x)$ от $\ln x$ высотного положения x (рис. 2б). В большинстве случаев коэффициент корреляции $R > 0,95$. По разным геомам j равенство (16) представляет собой пучок линий (рис. 2б), коэффициенты которых связаны соотношением (рис. 3а)

$$\eta_j = -\beta_j \ln x_0 + \ln E_0 \tag{17}$$

с постоянными значениями $\ln x_0 = 6,297$, $x_0 = 543$ м и $\ln E_0 = -1,823$, $E_0 = 0,162$ — общими для разных геомов, что означает функциональное единство их набора

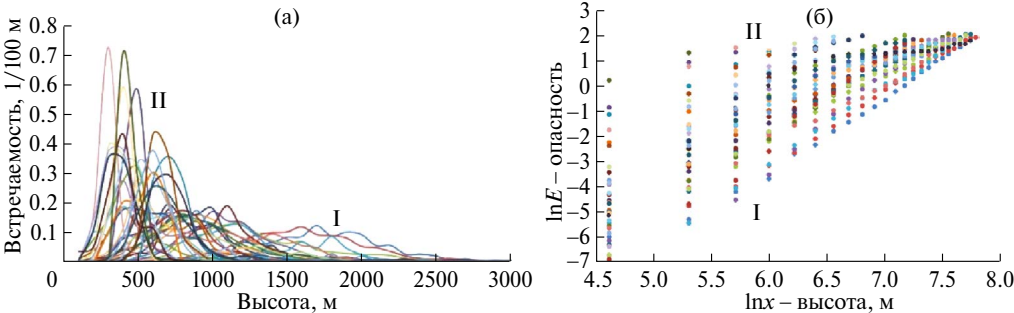


Рис. 2. а — сглаженные кривые распределения (встречаемости) разных геомов по высоте с шагом 100 м; б — зависимость величины интегрированной опасности от высоты местоположения (логарифмическая шкала): I — группа горных геомов, II — группа подгорных геомов.

Fig. 2. а — smoothed distribution curves (occurrence) of different geomorphs with height gradient step size 100 m; б — dependence of the value of the integrated hazard on the height location (logarithmic scale): I is a group of mountain geomorphs, II is a group of sub-mountain geomorphs.

на территории. Величина $\ln x_0 \approx 2\pi$ – характерная высота, деление x/x_0 на значение которой переводит абсолютные величины в относительные. Согласно (17), квантованность величины β_j предполагает квантованность и значений η_j . При подстановке (17) в (16) получаем универсальную зависимость $\ln[E_j(x)/E_0] = \beta_j[\ln(x/x_0)]$ в безразмерных переменных $Y = \ln[E_j(x)/E_0]$ и $y = \ln(x/x_0)$ типа $Y = \beta_j y$. Это означает, что для перехода от зависимости для одного геом j к другому l необходимо просто изменить величину коэффициента $\beta_j \rightarrow \beta_l$, подставить соответствующее значение β_l : $Y = \beta_l y$. Иными словами, требуется повернуть линию связи $Y = \beta_j y$ на новый угол φ_l ($\beta_l = \tan \varphi_l$) (см. рис. 2б). Отсюда также следует коррелированность линейных зависимостей ИО, например, $\ln E_l(x) = 0,808 \ln E_j(x) + 0,541$, $R = 0.99$ для связи геом (j, VI) редуцированного развития лиственничной горной тайги с подгольцовым лиственнично-редколесным и каменноберезовым геомом (l, IV) , что указывает на снижение разнообразия вертикальной структуры геомов при переходе от VI к IV.

Используем аналитическую зависимость $\beta_j y_m = \pi + \pi J$ для вычисления по значениям коэффициента высотно-поясной изменчивости $\beta_j = 2\alpha_j$ значений К-числа $J = \beta_j y_m / \pi - 1$ (рис. 3б). Для выявления числовой дискретности величина для всех геомов принята $y_m = 2,2$. Для первых по порядку геомов от гольцовых альпинотипных (I) до подгорных и межгорных понижений таежных темнохвойных геомов ограниченного развития прослеживается снижение К-уровней значений β_j с 3 до 0. Минимальное значение $\beta_j y_m = \pi + \pi J$ наблюдается при $J = 0$ и равно $\beta_0 = \pi / y_m \approx 1,589 / 100$ м по результатам расчета, что соответствует подгорным и межгорным понижениям таежному темнохвойному геому (XVI) и таежному кедрово-лиственничному геому (XVII) – оба ограниченного развития. Значение $y_m = \pi / \beta_0 = 1,976 \approx 2$ – это базовая амплитуда колебания изменчивости y , которая позволяет переводить размерные коэффициенты β_j в безразмерные $\beta_j y_m$, сравнивая их с числами.

В первом приближении качественная эволюция геомов исследователями рассматривается как серия скачкообразных переходов состояния геомов с одного К-уровня на другой с изменением пространственного и временного положения (рис. 4). В данном случае, величина скачка $v \beta_j \Delta \tau_j$ в выбранных единицах измерения соответствует одному кванту изменений $\Delta \beta_j y_m = \pi$ – универсальной математической константе π , соответствующей минимальному значению коэффициента изменчивости $\beta_j y_m = \pi$.

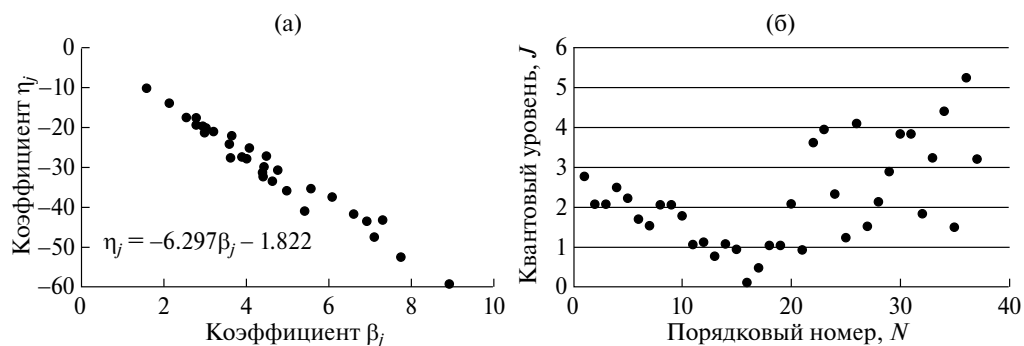


Рис. 3. а – зависимость коэффициентов η_j и β_j расчетной формулы $\ln E_j(x) = \beta_j \ln x + \eta_j$; б – квантовые уровни J К-состояний геомов по коэффициенту β_j . Точки – расчетные данные, линии – квантовые уровни $J = \beta_j y_m / \pi - 1$.
Fig. 3. а – dependence of the coefficients η_j and β_j of the calculation formula $\ln E_j(x) = \beta_j \ln x + \eta_j$; б – quantum levels J of the quantum states of geomes by the coefficient β_j . Points are calculated data, lines are quantum levels $J = \beta_j y_m / \pi - 1$.

За время $\Delta\tau = 1$ система изменяется $y_m \Delta\beta_j$ на один $\Delta J = 1$ квант π с разной скоростью v_j и постоянным периодом $y_m = v_j \Delta\tau_j$: $v_j \Delta\tau \beta_j = y_m \beta_j = \pi + \pi J$. Изменения в пространственной структуре показаны на графе (рис. 4), отражающем направления перехода из одного геомы (квантового уровня) к другому в соответствии с разработанными схемами [19] отношения пространственного и временного соседства. Группа точек одного К-уровня на графе (рис. 4) различаются по дополнительному К-числу, смысл и значение которого необходимо еще определить, принимая во внимание многомерность пространства факторов влияния. В одномерном случае собственное значение эволюционного оператора (энергии процесса) $H_j = -4(v_j \alpha_j)^2 = -(v_j \beta_j)^2$ по абсолютному значению равно квадрату произведения коэффициентов временной v_j и пространственной β_j изменчивости – величине дискретной, различающейся по К-уровнями J и по геомам j .

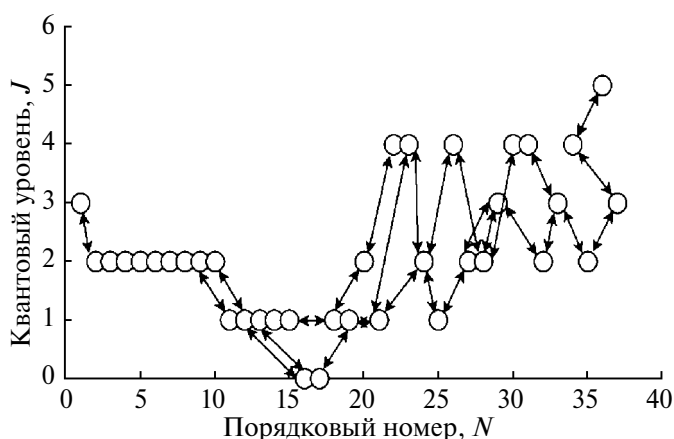


Рис. 4. Квантовые уровни J геомов и возможные направления их временной трансформации.

Fig. 4. Quantum levels of J geomes and possible directions of their temporal transformation.

Проведенный математический и статистический анализ доказывает правомерность К-подхода и предлагает методы расчета параметров моделей. Особенно это касается вычисления коэффициента пространственной $\alpha_j = \beta_j/2$ и временной $\lambda_j = v_j \beta_j$ изменчивости со скоростью v_j в логарифмических переменных, когда изменения протекают в собственном ритме $\tau = \ln(t/t_0)$ в масштабе характерного времени t_0 изучаемой геосистемы. В соответствии с уравнением (1) в геомном слое $f_j(\tau, y) = v_j \alpha_j \tau + \alpha_j y_j = v_j \alpha_j \tau + \alpha_j \ln(x - x_0)$ динамическое равновесие $f_j(\tau, y) = 0$ наступает в момент $t = t_0$ в условиях $x = x_0$ оптимума существования геосистемы данного типа. В динамическом процессе со скоростью v_j состояние системы либо отклоняется от этого оптимума, постепенно меняя значение переменной x , либо квантовым скачком $j \rightarrow l$ переходит в факторальную область другого геомы с оптимумом в точке x_{0l} . На этом в методе ординации основывается традиционный прием прогнозирования динамических и эволюционных изменений растительного покрова путем смещения значений факторов влияния и положения оптимума.

Имеется возможность картографировать состояния геомов по величине соответствующего К-числа (рис. 5). В Байкальской Сибири большую часть площади

занимают геомы 2-го К-уровня (47,7%) – гольцовые, подгольцовые и горнотаежные редуцированного развития. На втором месте по распространению (27,2%) находится первый К-уровень, представленный горнотаежными и подгорными лесами ограниченного и оптимального развития. Они обычно встречаются в котловинах байкальского и забайкальского типа. На третьем месте (13,7%) по распространению находятся геомы 4-го К-уровня. Это в основном подгорные и равнинные таежные леса разного породного состава. Далее в порядке убывания идет 3-й уровень (7,9%) темнохвойной южной тайги возвышенностей, луговые и травяно-пижмовые степи плакорных равнин, 0-й уровень (2,9%) подгорных и межгорных понижений темнохвойной и кедрово-лиственничной тайги ограниченного развития, наконец, 5-й уровень (0,7%) – травяно-пижмовые степи высоких местоположений.

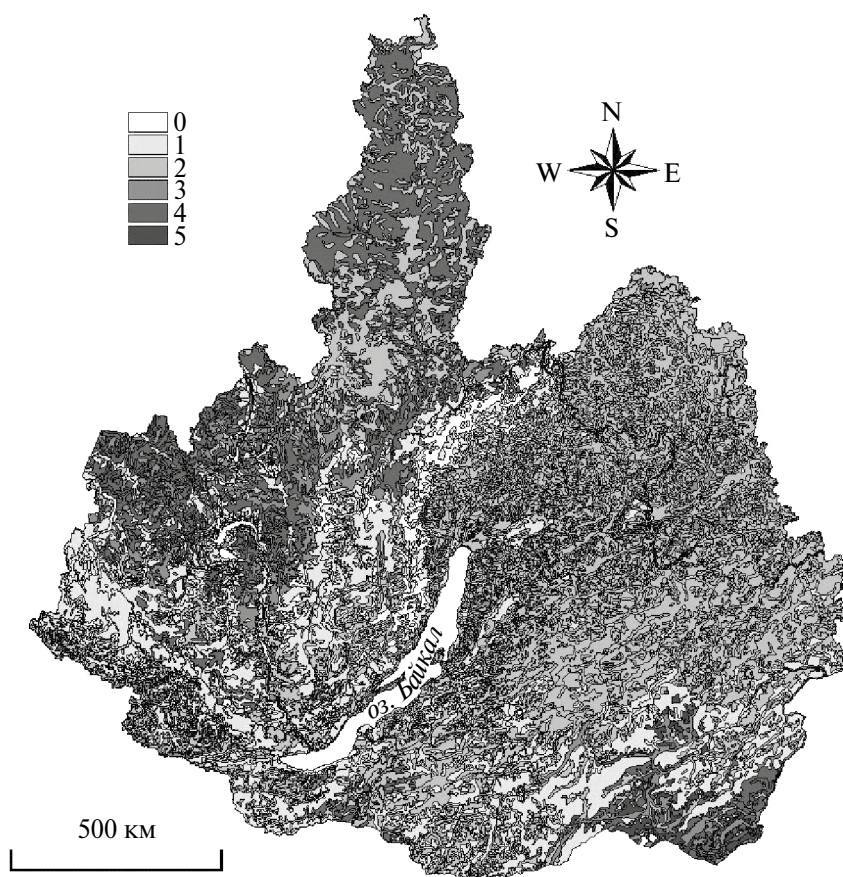


Рис. 5. Квантовые уровни (0–5) пространственно-временной изменчивости геомов Байкальской Сибири по географической характеристике высоты местоположения. Показаны границы ареалов разных геомов.
Fig. 5. Quantum levels (0–5) of the spatiotemporal variability of the geomes of Baikal Siberia according to the geographical characteristics of the location height. The boundaries of different geome sare shown.

Доля площади геомов на территории (встречаемость) соответствует весовым коэффициентам p_j в уравнении (4), моделирующем пространственную структуру региона (см. рис. 1б). Опасность существования (сохранения состояния) компонентов геосистем, судя по K -значениям, возрастает при переходе от равнинных к горным формированиям ($J = 0 \rightarrow 5$). Напротив, максимальная энергия эволюционных пространственно-временных преобразований приходится на 0-уровень, что соответствует тайге подгорных и межгорных понижений. Изменения в пространственную структуру геоизображения (см. рис. 5) вносятся на основе графа (см. рис. 4), отражающего направления перехода от одного геомов (квантового уровня) к другому квантовым скачком $\Delta J = 1$ за один такт Δt , на один квант $y_m \beta_j = \pi$.

Для количественного описания наблюдаемой зависимости $E_j(t, y)$ используется соотношение (12), за которым стоит виртуальное K -уравнение $\psi_j(t, y)$ (8) и определяющие его дифференциальные уравнения K -теории (7)–(9). Реализуется заявленное преобразование P :

$$\psi_j(t, y) \rightarrow \langle \psi_j | \psi_j \rangle \rightarrow E_j(y) \rightarrow P_j^*(x) \rightarrow P_j(x).$$

По функции ИО $E_j(t, y)$ восстанавливаются функции надежности $P_j^*(x)$ и плотности распределения $P_j(x)$ площади геомов по высоте $x = y + x_0$ и его изменения со временем и в пространстве с учетом фазового (средового) смещения x_0 . Таким образом реализуется исследовательский цикл дискретного анализа пространственной информации ландшафтной структуры территории Байкальской Сибири на уровне геомов. Здесь открывается новое обширное поле для количественных исследований ландшафтной структуры, для понимания территориального единства геосистем.

ВЫВОДЫ

Квантовая теория рассматривается как сквозная теория научных знаний, направленная на описание дискретных процессов и явлений в природе и обществе. В физической науке уравнения данной теории позволяют практически полностью описать все, что происходит и может происходить с системой, в математических терминах гильбертова пространства, отобразить набором квантовых чисел ее состояния. Предполагается, что геосистемы также могут быть однозначно описаны в соответствующих понятиях с учетом специфики географического знания, что продемонстрировано на примере высотно-поясной геомной структуры территории Байкальской Сибири.

По причине использования в географии разнокачественных независимых переменных и различия их размерности (измерения и масштаба) наблюдаемые величины должны быть центрированы и нормированы посредством логарифмирования их значений для выявления фундаментальных закономерностей. Функции плотности вероятности и соответствующие частотные распределения явлений по градациям этих величин рассматриваются в рамках теории надежности и их описание в итоге сводится к функциям и кривым интегрированной опасности и далее к скрытым (виртуальным) информационным Ψ -функциям квантовой теории. Прослеживается обратная процедура перехода от Ψ -функций к функциями плотности вероятности (встречаемости) для каждого геомов. Свойства топологической дискретизации геомов напрямую связывается с квантованностью коэффициентов уравнений влияния факторов среды на пространственно-временную изменчивость распределений. Географическая среда учитывается как фазовое смещение Ψ -функций, что отражается на положении максимумов встречаемости ареалов геомов разного типа. Таким

образом обосновываются известные методы сравнения и прогнозирования динамики и эволюции геосистем и предлагаются новые процедуры расчета структурной изменчивости.

Дискретный переход от Ψ -функции одного геоба к функции другого формально осуществляется резким поворотом линейной зависимости — сменой коэффициента пространственной изменчивости и модального значения высоты, что реально поэтапно происходит в географическом цикле горообразования. Логарифмические преобразования переменных, перевод их в относительные величины позволяет выделить в данных кванты, равные значению π , дискретного перехода с одного уровня на другой, что обосновывается теоретически. Реализована итерационная корректировка теоретических позиций в соответствии с результатами обработки данных, необходимая для лучшего объяснения и понимания географических закономерностей.

Получается, что в перспективе география может быть такой же точной и строгой наукой, как современная физика в силу сквозного характера квантово-теоретического знания, описывающего дискретные явления. Только для этого необходима адекватная интерпретация геосистем в рамках единой квантовой теории. Чем сложнее формальные конструкции (числа, переменные, функции, операторы), тем проще и полней математическое объяснение реальности. Например, для учета климатического и антропогенного влияния в оператор (гамильтониан), генерирующий эволюцию квантовых состояний, просто добавляются операторы потенциального поля воздействия. Сложные и целостные конструкции геосистем (геохоры) оказываются возможны благодаря реализации принципа суперпозиции дискретно-квантовых систем (геомеров). В целом, исследования в области геосистемного моделирования на языке квантовой теории имеют хорошую перспективу, дополняют другие методы пространственно-временного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкальский регион: общество и природа. Атлас / Ред. А.Р. Батуев, Л.М. Коротный, В.М. Плюснин. М.: Паулсен, 2021. 320 с.
2. Бакланов П.Я. Подходы и основные принципы структуризации географического пространства // Известия АН СССР. Сер. геогр. 2013. №5. С. 7–18.
3. Виноградов Б.В. Космические методы изучения природной среды. М.: Мысль, 1976. 286 с.
4. Виноградов Б.В., Черкашин А.К., Горнов А.Ю., Кулик К.Н. Динамический мониторинг деградации и восстановления пастбищ Черных Земель // Проблемы освоения пустынь. 1990. № 1. С. 10–19.
5. Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А. Модельные оценки влияния изменений климата на ареалы зональной растительности равнинных территорий России // Известия РАН. Сер. биол. 2007. № 2. С. 212–228.
6. Инсаров Г.Э., Борисова О.К., Корзухин М.Д., Кудяров В.Н., Минин А.А., Ольчев А.В., Семенов С.М., Сиринов А.А., Харук В.И. Природные экосистемы суши // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 190–265.
7. Коломыц Э.Г. Прогноз влияния глобальных изменений климата на ландшафтную структуру горной страны // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1985. №1. С. 14–30.
8. Коломыц Э.Г. Прогнозная оценка зональных ландшафтно-экологических условий в свете предстоящих глобальных изменений климата // География и природные ресурсы. 1999. №3. С. 5–13.

9. Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
10. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
11. Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 67–73.
12. Кулик К.Н. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2004. 248 с.
13. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. М 1:1500000 / Ред. О.П. Космакова, В.С. Михеев. М.: ГУГК, 1977. 4 л.
14. Назимова Д.И., Поликарпов Н.П. Возможен ли прогноз лесного покрова Сибири на XXI век? // Природа. 2001. №4. С. 55–62.
15. Природные условия и естественные ресурсы СССР. Предбайкалье и Забайкалье / Отв. ред. В.С. Преображенский. М.: Наука, 1965. 492 с.
16. Салугин А.Н., Кулик К.Н. Математические модели динамики и прогноза эволюции аридных экосистем. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 180 с.
17. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.
18. Фролов А.А. Прогнозное картографирование изменений ландшафтной структуры Прибайкалья при потеплении климата // Геодезия и картография. 2010. № 9. С. 27–32.
19. Фролов А.А. Принципы прогнозирования геомной структуры Предбайкалья при изменении климата // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 133–141.
20. Фролов А.А., Черкашин А.К. Клеточные автоматы – модели эволюционного картографирования ландшафтов юга Восточной Сибири // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Часть I. Иркутск.: ИСЭ СО РАН, 2007. С. 231–239.
21. Фролов А.А., Черкашин А.К. Эволюционное геоинформационное моделирование и картографирование // Геодезия и картография. 2009. № 6. С. 40–45.
22. Хромых В.В., Хромых О.В. Использование ГИС-технологий для изучения динамики долинных ландшафтов (на примере долины Нижней Томи) // Вестник Томского гос. ун-та. 2007. № 300-1. С. 230–233.
23. Черкашин А.К. Естественная классификация географических систем: модели представления знаний // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 31. С. 69–87.
24. Черкашин А.К. Иерархическая классификация географических систем // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2021. Т. 35. С. 125–153.
25. Черкашин А.К. Предмет географических исследований: метатеоретический подход // Известия РГО. 2022. Т.154. №2. С.1–19.
26. Черкашин А.К. Классификация геосистем: аксиоматический подход // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 102–126.
27. Черкашин А.К. Квантовая география: задачи типизации, классификации и районирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 47. С. 90–106.
28. Черкашин А.К., Лесных С.И., Красноштанова Н.Е. Геоинформационный мониторинг и математическое моделирование развития пандемии коронавируса COVID-19 // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 17–35.
29. Bittner T. Towards a Quantum Theory of Geographic Fields // 13th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2017). Leibniz International Proceedings in Informatics. Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrumfür Informatik, Dagstuhl Publishing. 2017. Article No. 5. P. 5:1–5:14.

30. *Bittner T.* Is there a quantum geography? // Tambassi, T. (eds), *The Philosophy of GIS / Springer-er Geography*. Springer Nature Switzerland AG. 2019. P. 209–239.
31. *Cherkashin A.K.* Polysystem Modelling of Geographical Processes and Phenomena in Nature and Society. *Mathematical modelling of natural phenomena*. 2009. Vol. 4. No. 5. P. 4–20.
32. *Cherkashin A.K., Lobycheva I.Yu.* Earth Science Theoretical Models for Quantitative Analysis of Global Spatial Data // *Geography and Natural Resources*. 2020. Vol. 41. No. 2. P. 123–132.
33. *Elliott H.M.* The Structure and Evolution of the Geographic System: a Study in Cultural Change. The University of Oklahoma, Ph.D. 1979. 455 p.
34. *Elliott H.M.* Cardinal Place Geometry // *Geographical Analysis*. 1985. No.17. P. 16–35.
35. *Fischer M.M., Leung Y.* (eds) *Geo Computational Modelling: Techniques and Applications*. Berlin, New York: Springer, 2001. 275 p.
36. *Gessler P.E., Moore I.D., Mckenzie N.J., Ryan P.J.* Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes // *International Journal of Geographical Information Science*. 1995. Vol. 9. No 4. P. 421–432.
37. *Harrison S.P., Prentice I.C., Barboni D., Kohfeld K.E., Ni J., Sutra J.-P.* Ecophysiological and bioclimatic foundations for a global plant functional classification // *Journal of Vegetation Science*. 2010. Vol. 21. No. 2. P. 300–317.
38. *Iliev B.Z.* Fiber bundle formulation of nonrelativistic quantum mechanics // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 2001. Vol. 34(23). P.4887–4918.
39. *Mathian H., Sanders L.* Spatio-temporal Approaches: Geographic Objects and Change Process. Wiley-ISTE. 2014. 176 p.
40. *Phillips J.D.* Landscape Evolution: Landforms, Ecosystems, and Soils. Elsevier Science. 2021. 356 p.
41. *Shugart H.H., Crow T.R., Hett J.M.* Forest succession models: a rational and methodology for modeling forest succession over large regions // *Forest Science*. 1973. Vol.19. No.3. P. 203–212.
42. *Vinogradov B.V., Cherkashin A.K., Gornov A.Yu., Kulik K.N.* Dynamic monitoring of degradation and restoration of pastures in the Black Lands of Kalmykia // *Problems of Desert Development*. New York: Allerton Press, 1990. No.1. P. 7–14.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы АААА-А21-121012190056-4).

Discrete Analysis of Spatial and Temporal Variability of Geosystems of Baikal Siberia**A. K. Cherkashin,* A. A. Frolov *****V. Sochava Institute of geography SB RAS, Irkutsk, Russia***E-mail: akcherk@irnok.net,****E-mail: f-v1984@mail.ru*

Annotation. The discrete spatial and temporal variability of the geosystem characteristics at the regional level (geomes) on the territory of Baikal Siberia has been theoretically and statistically studied. The concepts and equations of a unified quantum theory aimed at a fractional description of processes and phenomena in terms of the functional state of geomes in the Hilbert space of the superposition of functions of the altitude distribution of geosystems were used. Frequency distributions by elevation gradations were determined based on the combination of an electronic geome map and a digital terrain model. Geomes differ in modal height values corresponding to their highest occurrence — optimal conditions of existence in the territory. Distributions are transformed into indicators of integrated hazard, which are statistically transformed into information functions of through quantum theory. The coefficients of variability of these functions in terms of location height are quantized, differ by geomes, which is confirmed by the results of theoretical analysis. A map of the quantum levels of spatial and temporal variability of the geomes of Baikal Siberia and a scheme of spatial and temporal transitions between quantum levels (geomes) are constructed. The methods of forecasting the dynamics and evolution of geosystems are substantiated and new procedures for calculating the quantum variability of the temporal and spatial position of geomes are proposed.

Keywords: unified quantum theory, functional analysis, spatial and temporal variability, discrete states of geomes, digital relief model, Baikal Siberia

REFERENCES

1. Bajkal'skij region: obshhestvo i priroda. Atlas / Red. A.R. Batuev, L.M. Korytnyj, V.M. Pljusnin. M.: Paulsen, 2021. 320 s.
2. Baklanov P.Ja. Podhody i osnovnye principy strukturizacii geograficheskogo prostranstva // Izvestija AN SSSR. Ser. geogr. 2013. № 5. S. 7–18.
3. Vinogradov B.V. Kosmicheskie metody izuchenija prirodnoj sredy. M.: Mysl', 1976. 286 s.
4. Vinogradov B.V., Cherkashin A.K., Gornov A.Ju., Kulik K.N. Dinamicheskij monitoring degradacii i vosstanovlenija pastbishh Chernyh Zemel' // Problemy osvoenija pustyn'. 1990. № 1. S. 10–19.
5. Golubjatnikov L.L., Denisenko E.A. Model'nye ocenki vlijanija izmenenij klimata na arealy zonal'noj rastitel'nosti ravninnyh territorij Rossii // Izvestija RAN. Ser. biolog. 2007. № 2. S. 212–228.
6. Insarov G.Je., Borisova O.K., Korzuhin M.D., Kudejarov V.N., Minin A.A., Ol'chev A.V., Semenov S.M., Sirin A.A., Haruk V.I. Prirodnye jekosistemy sushi // Metody ocenki posledstvij izmenenija klimata dlja fizicheskikh i biologicheskikh sistem. M.: Rosgidromet, 2012. S. 190–265.
7. Kolomyc Je.G. Prognoz vlijanija global'nyh izmenenij klimata na landshaftnuju strukturu gor'noj strany // Izvestija AN SSSR. Ser. geogr. 1985. № 1. S. 14–30.
8. Kolomyc Je.G. Prognoznaja ocenka zonal'nyh landshaftno-jekologicheskikh uslovij v svete predstavljajushih global'nyh izmenenij klimata // Geografija i prirodnye resursy. 1999. № 3. S. 5–13.

9. Kolomyc Je.G. Regional'naja model' global'nyh izmenenij prirodnoj sredy. M.: Nauka, 2003. 371 s.
10. Kolomyc Je.G. Lokal'nye mehanizmy global'nyh izmenenij prirodnih jekosistem. M.: Nauka, 2008. 427 s.
11. Kornienko S.G. Ocenka transformacij prirodnih landshaftov Tazovskogo poluostrova po dan-nym kosmicheskoy s'emki // Geografija i prirodnye resursy. 2011. № 1. S. 67–73.
12. Kulik K.N. Agrolesomeliorativnoe kartografirovanie i fitojekologicheskaja ocenka aridnyh landshaftov. Volgograd: VNIALMI, 2004. 248 s.
13. Landshafty juga Vostochnoj Sibiri. Karta. M 1:1500000 / Red. O.P. Kosmakova, V.S. Miheev. M.: GUGK, 1977. 4 l.
14. Nazimova D.I. Polikarpov N.P. Vozmozen li prognoz lesnogo pokrova Sibiri na XXI vek? // Priroda. 2001. № 4. S. 55–62.
15. Prirodnye uslovija i estestvennye resursy SSSR. Predbajkal'e i Zabajkal'e / Ott. red. V.S. Preo-brazhenskij. M.: Nauka, 1965. 492 s.
16. Salugin A.N., Kulik K.N. Matematicheskie modeli dinamiki i prognoza jevoljucii aridnyh jeko-sistem. Volgograd: VNIALMI, 2006. 180 s.
17. Sochava V.B. Vvedenie v uchenie o geosistemah. Novosibirsk: Nauka, 1978. 318 s.
18. Frolov A.A. Prognoznnoe kartografirovanie izmenenij landshaftnoj struktury Pribajkal'ja pri poteplenii klimata // Geodezija i kartografija. 2010. № 9. S. 27–32.
19. Frolov A.A. Principy prognozirovanija geomnoj struktury Predbajkal'ja pri izmenenii klimata // Geografija i prirod. resursy. 2011. № 3. S. 133–141.
20. Frolov A.A., Cherkashin A.K. Kletochnye avtomaty – modeli jevoljucionnogo kartografirovani-ja landshaftov juga Vostochnoj Sibiri // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. Chast' I. Irkutsk.: ISJe SO RAN, 2007. S. 231–239.
21. Frolov A.A., Cherkashin A.K. Jeoljucionnoe geoinformacionnoe modelirovanie i kartografiro- vanie // Geodezija i kartografija. 2009. № 6. S. 40–45.
22. Hromyh V.V., Hromyh O.V. Ispol'zovanie GIS-tehnologii dlja izuchenija dinamiki dolinnyh landshaftov (na primere doliny Nizhnej Tomi) // Vestnik Tomskogo gos. un-ta. 2007. № 300-1. S. 230–233.
23. Cherkashin A.K. Estestvennaja klassifikacija geograficheskikh sistem: modeli predstavlenija znaniy // Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Nauki o Zemle. 2020. T. 31. S. 69–87.
24. Cherkashin A.K. Ierarhicheskaja klassifikacija geograficheskikh sistem // Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle. 2021. T. 35. S. 125–153.
25. Cherkashin A.K. Predmet geograficheskikh issledovanij: metateoreticheskij podhod // Izvestija RGO. 2022. T. 154. № 2. S.1–19.
26. Cherkashin A.K. Klassifikacija geosistem: aksiomaticheskij podhod // Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Nauki o Zemle. 2023. T. 43. S. 102–126.
27. Cherkashin A.K. Kvantovaja geografija: zadachi tipizacii, klassifikacii i rajonirovaniya // Izvesti- ja Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Nauki o Zemle. 2024. T. 47. S. 90–106.
28. Cherkashin A.K., Lesnyh S.I., Krasnoshtanova N.E. Geoinformacionnyj monitoring i matem- aticheskoe modelirovanie razvitiya pandemii koronavirusa COVID-19 // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. 2021. № 1 (21). S. 17–35.
29. Bittner T. Towards a Quantum Theory of Geographic Fields // 13th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2017). Leibniz International Proceedings in Informat- ics. Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrumfür Informatik, Dagstuhl Publishing. 2017. Article № 5. P. 5:1–5:14.
30. Bittner T. Is there a quantum geography? // Tambassi, T. (eds), The Philosophy of GIS / Springer Geography. Springer Nature Switzerland AG. 2019. P. 209–239.

31. Cherkashin A.K. Polysystem Modelling of Geographical Processes and Phenomena in Nature and Society. Mathematical modelling of natural phenomena. 2009. Vol. 4. № 5. P. 4–20.
32. Cherkashin A.K., Lobycheva I.Yu. Earth Science Theoretical Models for Quantitative Analysis of Global Spatial Data // Geography and Natural Resources. 2020. Vol. 41. № 2. P. 123–132.
33. Elliott H.M. The Structure and Evolution of the Geographic System: a Study in Cultural Change. The University of Oklahoma, Ph.D. 1979. 455 p.
34. Elliott H.M. Cardinal Place Geometry // Geographical Analysis. 1985. № 17. P. 16–35.
35. Fischer M.M., Leung Y. (eds) Geo Computational Modelling: Techniques and Applications. Berlin, New York: Springer, 2001. 275 p.
36. Gessler P.E., Moore I.D., Mckenzie N.J., Ryan P.J. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes // International Journal of Geographical Information Science. 1995. Vol. 9. No 4. P. 421–432.
37. Harrison S.P., Prentice I.C., Barboni D., Kohfeld K.E., Ni J., Sutra J.-P. Ecophysiological and bioclimatic foundations for a global plant functional classification // Journal of Vegetation Science. 2010. Vol. 21. № 2. P. 300–317.
38. Iliev B.Z. Fiber bundle formulation of nonrelativistic quantum mechanics // Journal of Physics A: Mathematical and General. 2001. Vol. 34(23). P.4887–4918.
39. Mathian H., Sanders L. Spatio-temporal Approaches: Geographic Objects and Change Process. Wiley-ISTE. 2014. 176 p.
40. Phillips J.D. Landscape Evolution: Landforms, Ecosystems, and Soils. Elsevier Science. 2021. 356 p.
41. Shugart H.H., Crow T.R., Hett J.M. Forest succession models: a rational and methodology for modeling forest succession over large regions // Forest Science. 1973. Vol. 19. № 3. P. 203–212.
42. Vinogradov B.V., Cherkashin A.K., Gornov A.Yu., Kulik K.N. Dynamic monitoring of degradation and restoration of pastures in the Black Lands of Kalmykia // Problems of Desert Development. New York: Allerton Press, 1990. № 1. P. 7–14.