



Российская академия наук

ИЗВЕСТИЯ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

Том 152 № 3 2020 Май—Июнь

Основан в 1865 г.
Выходит 6 раз в год

Журнал издается под руководством Отделения наук о Земле РАН

Главный редактор
В. М. Разумовский

Редакционная коллегия

К. В. Чистяков (зам. гл. ред.), Г. А. Исаченко (отв. секр.),
И. Л. Башмачников, Д. Ю. Большиянов, С. А. Гаврилкина,
Д. А. Ганюшкин, Б. С. Жихаревич, Г. Иоффе, Т. Г. Нефёдова,
А. Ю. Опекунов, Е. А. Паниди, Д. Хаазе, С. С. Холод

Редакционный совет

П. Я. Бакланов, В. Венде, С. А. Добролюбов, С. С. Зилитинкевич,
Н. С. Касимов, В. А. Колосов, В. М. Котляков, И. А. Максимцев,
В. А. Румянцев, О. Н. Соломина, В. А. Тишков, А. К. Тулохонов,
Г. М. Федоров, Н. Н. Филатов, А. А. Чибилёв

Адрес редакции:

190000, Санкт-Петербург, пер. Гривцова, 10,
тел.: +7 (800) 700-18-45, e-mail: izvestia-rgo.martinova@yandex.ru

Москва

ООО «ИКЦ «АКАДЕМКНИГА»

Оригинал-макет подготовлен ООО «ИКЦ «АКАДЕМКНИГА»

© Российская академия наук, 2020
© Редколлегия журнала "Известия Русского
географического общества" (составитель), 2020

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
№ 0110279 от 08 февраля 1993 г., выдано Министерством печати и информации
Российской Федерации

Подписано к печати 08.06.2020 г.	Формат $70 \times 100^{1/16}$	Усл. печ. л. 8.13	Уч.-изд. л. 9.09
Тираж 21 экз.	Зак. 3192	Бесплатно	

Учредители: Российская академия наук,
Русское географическое общество, Институт озероведения РАН

Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14
Исполнитель по госконтракту 4У-ЭА-041-19 ООО «ИКЦ «АКАДЕМКНИГА»,
117342 Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б, а/я 47

16+

Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.),
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151

СОДЕРЖАНИЕ

Том 152, номер 3, 2020

Концепция подводного ландшафта <i>К. М. Петров</i>	3
Уникальные озера как объект научного интереса <i>Ш. Р. Поздняков, А. В. Измайлова, А. М. Расулова</i>	17
Термический режим малых озер Карелии (расчеты на численной модели FLake) <i>Н. И. Пальшин, Т. В. Ефремова, Г. Э. Здоровеннова, Г. Г. Гавриленко, Р. Э. Здоровеннов, А. Ю. Тержеевик, С. Р. Богданов</i>	32
Некоторые результаты дендрохронологических исследований на верхней границе леса в аридных высокогорьях Западной Тувы <i>М. А. Колунчукова, А. И. Резников</i>	45

КОНЦЕПЦИЯ ПОДВОДНОГО ЛАНДШАФТА

© 2020 г. К. М. Петров*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: k.petrov@spbu.ru*

Поступила в редакцию 27.06.2020 г.

После доработки 19.09.2020 г.

Принята к публикации 20.09.2020 г.

Комплексное изучение береговой зоны моря — одна из актуальных задач современной географии. Подводное ландшафтоведение в России опирается на теоретические положения отечественной географической школы В.В. Докучаева—Л.С. Берга. Развитию морских ландшафтных исследований в XX в. способствовало появление аквалангов и технических средств дистанционного зондирования. В статье обсуждаются общие положения концепции подводного ландшафта, дается его определение, рассматриваются особенности морфологического строения и основные ландшафтообразующие факторы. Ландшафт береговой зоны моря определяется как относительно однородный участок подводного берегового склона, обладающий однотипным геологическим строением, рельефом, грунтами, гидроклиматом (температурой, соленостью, течениями, волновыми процессами) и однотипными группировками гидробионтов. Он характеризуется определенным сочетанием внутриландшафтных природных комплексов (фаций, угодий), представляющих собой особые биотопы донных биоценозов. Ландшафты береговой зоны моря охватывают прибрежную сушу, подверженную воздействию прибоя (супралитораль), окраину суши, заливаемую во время прилива (литораль) и подводный береговой склон до глубины, где воздействие волновых процессов затухает и освещенность недостаточна для формирования сообществ макрофитов (сублитораль). Подводный ландшафт рассматривается как основная исходная единица ландшафтного районирования морских мелководий. Программы работ, разработанные с учетом названных положений, обеспечат полноту и сравнимость исследований, выполненных разными авторами. Концепция подводного ландшафта иллюстрируется примером результатов изучения Притаманского ландшафта в северо-восточной части Черного моря.

Ключевые слова: подводный ландшафт, береговая зона моря, подводный береговой склон, донные природные комплексы, угодья, фации, супралитораль, литораль, сублитораль, Притаманский ландшафт, северо-восток Черного моря

DOI: 10.31857/S0869607120030064

Береговая зона и шельф — это часть географической оболочки, богатая и разнообразная природа которой формируется в результате активного взаимодействия гидрометеорологического, геолого-геоморфологического и биогидроценотического звеньев физико-географического процесса [13]. Развитие ландшафтоведения береговой зоны и шельфа в России опирается на теоретические положения отечественной географической школы В.В. Докучаева—Л.С. Берга. Крупным событием начала 60-х гг. XX в. стало создание сотрудниками Зоологического института АН СССР под руководством Е.Ф. Гурьяновой и Г.У. Линдберга карт подводных ландшафтов Южного Сахалина и южных Курильских островов [4, 9]. Применение методов аэрофотосъемки дна морских мелковод-

дий и комплекса морских и подводных работ для дешифрирования аэрофотоизображений морского дна открыли новые возможности в изучении береговой зоны моря [2, 11]. Несмотря на важность аэрофотометодов, их применение в СССР было ограничено из-за режима секретности как аэросъемки, так и распространения ее материалов. Дальнейшему развитию морских ландшафтных исследований способствовало появление и широкое использование аквалангов [1, 6–8]. В начале XXI в. большие перспективы изучения береговой зоны и шельфа Мирового океана открылись благодаря современным методам дистанционного зондирования (космические изображения высокого разрешения, аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов – дронов).

Развитие ландшафтных исследований в береговой зоне и на шельфе требует четкого определения понятия подводный ландшафт, его морфологической структуры и ландшафтообразующих факторов, а также рассмотрения подводного ландшафта как основной исходной единицы ландшафтного районирования морских мелководий. Программы работ, построенные с учетом названных требований, могут обеспечить полноту и сравнимость результатов исследований, выполненных разными авторами. Ландшафты береговой зоны моря (подводного берегового склона) обладают сложной природой, но вместе с этим наиболее доступны для изучения и картографирования.

При написании статьи использованы материалы экспедиций 1960-х гг., проводимых Лабораторией аэрометодов АН СССР (ныне Всероссийский научно-исследовательский институт аэрокосмических методов, ВНИИКАМ). Научный руководитель экспедиции В.В. Шарков, начальник геоморфологического отряда З.И. Гурьева, начальник гидробиологического отряда К.М. Петров. Морские исследования включали эхолотное и геолокационное профилирование, а также взятие образцов грунта с помощью дночерпателя и драги. Подводные исследования проводились автором, они включали описание облика донных природных комплексов, подводное фотографирование, отбор образцов бентоса и горных пород.

ПОДВОДНЫЙ ЛАНДШАФТ, ЕГО ПРИРОДНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СТРУКТУРА

Подводный ландшафт береговой зоны моря (ПЛБЗ) – относительно однородный участок береговой зоны, качественно отличающийся от других участков своей структурой, т.е. с однотипным геологическим строением, рельефом, грунтами, гидроклиматом (температурой, соленостью, течениями, волновыми процессами) и с однотипными группировками гидробионтов. ПЛБЗ – наименьшая исходная таксономическая единица ландшафтного районирования, он не пересекается границами таксонов более высокого ранга, относится к одной природной зоне, лежит в пределах верхнего пояса неритического яруса, ограничен одной региональной морфоструктурой [14]. Каждый подводный ландшафт характеризуется своеобразным сочетанием внутриландшафтных природных комплексов (фаций, угодий), представляющих собой биотопы донных биоценозов. ПЛБЗ охватывают прибрежную сушу, подверженную воздействию прибоя – супралитораль, заливаемую во время прилива – литораль и морское дно до глубины, где воздействие волновых процессов затухает и освещенность недостаточна для формирования сообществ макрофитов – сублитораль (верхний пояс неритического яруса). Глубже ПЛБЗ сменяются ландшафтами элиторальной зоны (среднего пояса неритического яруса).

Благодаря положению ландшафтов береговой зоны на рубеже суши и моря их формирование происходит при активном взаимодействии компонентов основных геосфер: атмосферы, гидросферы, литосферы, биосферы. К природным факторам, обуславливающим богатство и разнообразие ландшафтов морских мелководий, относятся:

– связь гидрологических условий с метеорологическим режимом атмосферы, выраженный сезонный ритм природных процессов;

- подвижность вод, контролирующая процессы абразии, литодинамики и аккумуляции осадков, а также способствующая хорошей аэрации, притоку питательных веществ и разносу зачатков организмов;
- проникновение солнечной радиации, поддерживающей фотосинтез фитопланктона и фитобентоса;
- разгрузка речного стока, вызывающая сильную изменчивость солености морских вод, их обогащение биогенными и органическими веществами; твердый сток принимает основное участие в питании вдольберегового потока наносов;
- большое видовое разнообразие и богатство жизненных форм, способствующие высокой плотности заселения всевозможных экологических ниш на поверхности моря, в толще воды, на поверхности дна и в грунте; высокая биологическая продуктивность;
- влияние плейстоценовой регрессии, с которой связаны реликтовые формы рельефа и фации донных отложений, разорванные ареалы организмов и влияние голоценовой трансгрессии, с которой связана молодость подводных ландшафтов.

Отметим основные свойства подводных ландшафтов:

- ландшафт морского дна обособляется на участке земной коры, имеющем в общем одинаковое геологическое строение; как правило, он связан с развитием одной региональной морфоструктуры;
- каждому ландшафту свойственен определенный набор литологических разностей современных донных отложений или выходов коренных пород, контролирующих характер скульптурных микро- и мезоформ подводного рельефа;
- подводная освещенность, температура и волновые процессы изменяются с глубиной, что обуславливает вертикальное подразделение береговой зоны;
- разнообразие форм рельефа, грунтов, гидрологических обстановок определяют пестроту биотопов и соответственно разнообразие донных биоценозов.

Все это служит основанием для выделения системы морфологических единиц внутриландшафтной дифференциации и применения ландшафтно-биономического метода исследования структуры бентоса.

Донные природные комплексы (ДПК), связанные с характерными формами рельефа, грунтами и группировками гидробионтов, как правило, обладают своеобразным внешним видом, поэтому в ландшафтоведении они получили название морфологических единиц внутриландшафтного подразделения. Характеристика морфологической структуры ПЛБЗ моря включает описание единиц горизонтального и вертикального подразделений.

Основными единицами горизонтального подразделения ПЛБЗ являются *фация* и *угодье*.

Подводная фация — наименьший элементарный ДПК. Она представляет конкретный биотоп, связанный с одной формой микрорельефа или одним элементом мезорельефа (вершина, склон, подножье банки), и расположена в определенном интервале глубин. Фация сложена одной литологической разностью современных осадков или приурочена к однородному по вещественному составу выходу горных пород и занята одним биоценозом. Комплекс фаций образует подводное угодье.

Подводное угодье — это ДПК, связанный с определенной мезоформой рельефа, обладающий хорошо выраженными границами. Дифференцированное развитие локальных структур определяет формирование угодий двух типов. На структурах, испытывающих поднятие, происходит размыв дна, и формируются угодья абразионно-скульптурного типа: вдольбереговой пояс скал, подводные банки и рифы вдались от берега. У структур, испытывающих опускание, происходит седиментационное выравнивание дна и формирование угодий аккумулятивного типа. На участках активной литодинамики подводные угодья представлены береговыми валами, подводными косами и т.п.

В спокойной гидродинамической обстановке на участках устойчивого осадконакопления происходит формирование угодий монотонных песчано-илистых равнин.

Важным экологическим фактором названных угодий выступают свойства грунта. Хорошо известны сообщества гидробионтов-обрастателей, связанных с каменистыми грунтами, и сообщества организмов, закапывающихся в рыхлый грунт, в облике которых находят отражение приспособительные признаки, обусловленные образом жизни на разных типах грунта.

Вертикальная дифференциация морских мелководий отражает высоту воздействия прибоя, ритмику приливо-отливных явлений, ослабление волнения и угасание подводной освещенности с глубиной. Под влиянием названных факторов находятся процессы рельефообразования, осадконакопления, а также вся совокупность экологических условий, определяющих распределение донных биоценозов. Батиметрический профиль служит основой сопряженного ряда ДПК. Закономерной смене с глубиной подвержены и фации, и угодья, и целые ландшафты.

Главными единицами подразделения ПЛБЗ по глубине являются вертикальные зоны. Предлагается выделять в верхнем поясе неритического яруса три вертикальные зоны: *супралитораль*, *литораль (псевдолитораль)*, *сублитораль* [10]. Глубже простирается элиторальная зона, относящаяся к среднему поясу неритического яруса.

Следующую единицу, на которую зоны делятся по вертикали, предлагается именовать *этажом*. В супралиторали они отражают высоту воздействия прибоя; в литорали — ритмы прилива и отлива, в сублиторали — ослабление воздействия волн на дно и угасание подводной освещенности. Иногда внутри этажей выделяются *ступени*, отличающиеся по составу донных биоценозов. Величина интервалов вертикальных подразделений меняется с глубиной от сантиметров до метров; в целом система единиц вертикального подразделения ПЛБЗ напоминает пружину, сжатую в начале и растянутую на конце.

Представление о морфологических единицах занимает особое место в учении о подводных ландшафтах. Именно они служат непосредственным объектом морских и подводных исследований и картографирования. В результате анализа закономерных пространственных сочетаний морфологических единиц выделяются и сами ландшафты.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Район исследования занимает подводный склон Таманского полуострова на северо-востоке Черного моря: на западе он ограничен Керченским проливом, на востоке — Анапской пересыпью. Это материковая отмель шириной до 40–60 км, которая выделяется в качестве Притаманского подводного ландшафта [12]. Морское дно сложено отложениями миоцен-плиоценового возраста, состоящими из рыхлой толщи глин, песков с прослоями и включениями плотносцементированных пород мергеля, бурого железняка, известняка. Подводная абразионно-аккумулятивная равнина осложнена несколькими брахиантиклинальными складками. Многочисленные банки, рифы, гряды и т.п. приурочены к куполам антиклиналей и крыльям антиклинальных складок. Там, где дно сложено легко разрушающимися породами, возникают пространства абразионного выравнивания [3].

Покров современных морских осадков в Притаманском подводном ландшафте обладает незначительной мощностью, местами он прерывается. Ограниченность выноса пролювиального терригенного материала с суши объясняется отсутствием на Таманском полуострове развитой гидрографической сети. Характерная особенность Притаманского ландшафта — широкое распространение обширных выровненных пространств, покрытых маломощным слоем ракуши. У мыса Железный рог в результате абразии надрудных песчаных слоев на подводном береговом склоне формируются аккумулятивные формы рельефа.

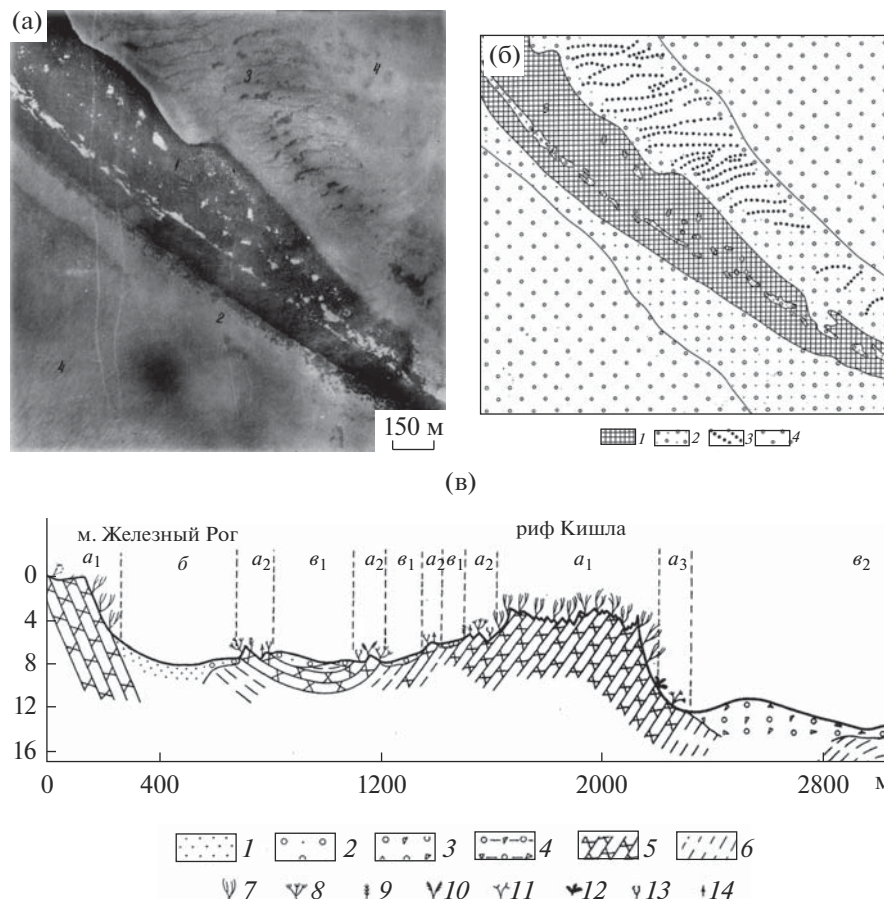


Рис. 1. Притаманский подводный ландшафт, акватория рифа Кишла: а) аэрофотоснимок: 1 – подводный риф, образованный мощными пластами бурых железняков рудного горизонта, обросших бурыми водорослями *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata* и др., 2 – выровненные пространства, покрытые песчано-ракушечными наносами, 3 – положительные песчано-ракушечные формы волновой аккумуляции, 4 – поля ракушки; б) ландшафтная карта: 1 – угодье скал и камней, биоценоз *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata*, 2 – выровненные пространства, покрытые песчано-ракушечными наносами, 3 – положительные песчано-ракушечные формы волновой аккумуляции, 4 – поля ракушки; в) ландшафтный профиль: 1–6 – грунты: 1 – песок, 2 – детритный песок с примесью ракушки, 3 – ракушка (танатоценоз створок мидий, устриц, гребешка и др.), 4 – заиленная ракушка, 5 – камни и скалы (устойчивые к разрушению пласты бурого железняка), 6 – глины в коренном залегании; 7–14 – доминанты растительных сообществ: 7 – *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata*, 8 – *Nereia filiformis*, 9 – *Chondria capillaris*, 10 – *Dasya baillouviana*, 11 – *Ceramium virgatum*, 12 – *Phyllophora crispa*, 13 – *Dictyota* (*Dilophus*) *fasciola*, 14 – *Laurencia obtusa*; а–в – подводные угодья: а – скалы и камни, б – песчаные равнины, в – поля ракушки.

Fig. 1. The Taman underwater landscape, water area of Kishla reef: а) aerial picture: 1 – underwater reef formed by thick layers of brown ironstone ore horizon overgrown with brown algae *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata*, etc., 2 – leveled spaces covered with sand-shell sediments, 3 – positive sand-shell forms of wave accumulation, 4 – shell fields; б) map of landscape: 1 – landform of rocks and stones, biocenosis of *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata*, 2 – leveled spaces covered with sand-shell deposits, 3 – positive sand-shell forms of wave accumulation, 4 – shell fields; в) profile of landscape: 1–6 – deposits: 1 – sand, 2 – detritus sand with an admixture of shells, 3 – shells (thanatocoenose of the valves of mussels, oysters, scallops, etc.), 4 – silted shells, 5 – stones and rocks (resistant to abrasion layers of brown iron ore), 6 – clay in situ; 7–14 – dominants of phytocoenoses: 7 – *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata*, 8 – *Nereia filiformis*, 9 – *Chondria capillaris*, 10 – *Dasya baillouviana*, 11 – *Ceramium virgatum*, 12 – *Phyllophora crispa*, 13 – *Dictyota* (*Dilophus*) *fasciola*, 14 – *Laurencia obtusa*; а–с – underwater landforms: а – stones and rocks, б – sandy plains, в – shell fields.

В Черном море, где приливы практически не выражены, выделяется псевдолитораль, где земноводный режим поддерживается омытием кромки берега волнами. Мелководье Притаманского ландшафта на глубине до 20–25 м относится к сублиторальной зоне. На глубинах более 25 м формируется ландшафт илисто-ракушечной равнины, относящийся к элиторальной зоне.

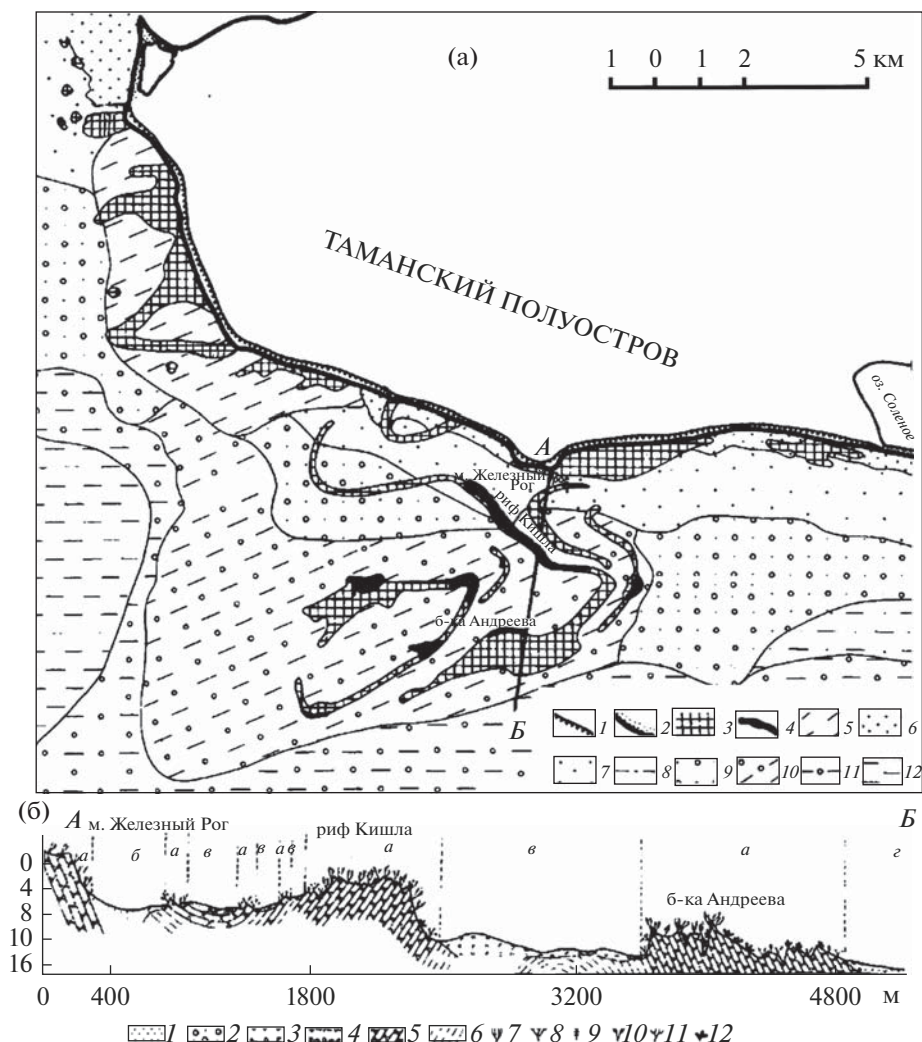
Основным методом изучения и картографирования Притаманского ландшафта служило дешифрирование аэрофотоснимков (АФС) морских мелководий, опирающееся на комплекс морских, геофизических и подводных исследований [2, 11]. Притаманский ландшафт характеризуется значительной шириной мелководья, доступного для аэрофотографирования. Изображение морского дна было получено для большей части абразионно-аккумулятивной равнины, на удалении до 6–7 км от берега. Разнообразие рисунков на АФС морского дна связано с угодьями скал и камней, и их сочетаниями с угодьями полей ракушки. Например, рассмотрим дешифровочные признаки подводного рифа Кишла, образованного пластами бурого железняка. Здесь водоросли, обрастающие скалы, придают изображению рифа на АФС темный тон, позволяющий распознать его очертания на фоне светлого тона аккумулятивной равнины (рис. 1а). С помощью простейшего преобразования изображение может быть переведено в графическую форму и представлено в виде карты (рис. 1б). Более полное представление о расположении подводных угодий, отображенных на АФС и карте, о подводной растительности и грунтах дает ландшафтный профиль (рис. 1в).

ПРИТАМАНСКИЙ ПОДВОДНЫЙ ЛАНДШАФТ, СЕВЕРО-ВОСТОК ЧЁРНОГО МОРЯ

Характерные черты морфологической структуры Притаманского подводного ландшафта отражены на составленной в результате дешифрирования АФС ландшафтной

Рис. 2. Биомическая структура Притаманского ландшафта: а) ландшафтная карта, линия *AB* — место ландшафтного профиля. Условные обозначения: 1 — абразионные берега с активным клифом, 2 — аккумулятивные берега с песчаным пляжем; 3–12 — формы рельефа, определяющие подводные угодья: 3–5 — абразионно-скульптурные формы (3 — скалы и камни, сочетающиеся с полями ракушки, 4 — четко выраженные банки и рифы, 5 — обнажения коренных глин), 6–8 — песчаные равнины сублиторали (6 — верхний этаж, среднезернистые пески с примесью ракушки, 7 — средний этаж, слегка заиленные тонкозернистые пески, 8 — нижний этаж, заиленные тонкозернистые пески с примесью ракушки), 9–11 — поля ракушки сублиторали (9 — верхний этаж, детритные пески с примесью ракушки, 10 — средний этаж, ракушка, 11 — нижний этаж, заиленная ракушка), 12 — илисто-ракушечные равнины элиторали; б) ландшафтный профиль: 1–6 — грунты: 1 — песок, 2 — детритный песок с примесью ракушки, 3 — ракушка (танатоценоз створок мидий, устриц, гребешка и др.), 4 — заиленная ракушка, 5 — камни и скалы (устойчивые к разрушению пласты мергеля, известняка, бурого железняка), 6 — глины в коренном залегании; 7–12 — доминанты растительных сообществ: 7 — *Treptacantha (Cystoseira) barbata*, 8 — *Nereia filiformis*, 9 — *Chondria capillaris*, 10 — *Dasya baillouviana*, 11 — *Ceramium virgatum*, 12 — *Phyllophora crispa*; а–з — подводные угодья: а — скалы и камни, б — песчаные равнины, в — поля ракушки, г — заиленная ракушка.

Fig. 2. Bionomic structure of the Taman underwater landscape: а) map of landscape, line *AB* — location of the landscape profile. Symbols: 1 — abrasive coasts with an active cliff, 2 — accumulative coasts with a sandy beach; 3–12 — the forms of relief that define underwater landforms: 3–5 — the abrasive-sculptural forms (3 — rocks and stones combined with shell fields, 4 — clearly defined banks and reefs, 5 — outcrops of clay in situ); 6–8 — the sandy plains in sublittoral (6 — the upper floor, medium-grained sands with an admixture of shell, 7 — the middle floor, slightly silty fine-grained sand, 8 — the lower floor, silty fine-grained sands with an admixture of shell), 9–11 — the shell fields in sublittoral (9 — the upper floor, detritus sand with an admixture of shells, 10 — the middle floor, shells, 11 — the lower floor, silted shells), 12 — the silty-shell plain in elittoral; б) profile of landscape: 1–6 — deposits: 1 — sand, 2 — detritus sand with an admixture of shells, 3 — shells (thanatocoenosis of mussels, oysters, scallops, etc.), 4 — silted shell, 5 — stones and rocks (resistant to abrasion layers of marl, limestone, brown iron ore), 6 — clay in situ; 7–12 — dominants of phytocoenoses: 7 — *Treptacantha (Cystoseira) barbata*, 8 — *Nereia filiformis*, 9 — *Chondria capillaris*, 10 — *Dasya baillouviana*, 11 — *Ceramium virgatum*, 12 — *Phyllophora crispa*; а–г — underwater landforms: а — rocks and stones, б — sandy plains, в — shell fields, г — silted shell.



карте (рис. 2а). Взаимное отношение подводных угодий, показанных на карте, отображено на ландшафтном профиле (рис. 2б). Приведем описание основных типов подводных угодий: 1) скалы и камни, 2) выходы коренных глин, 3) поля ракушки, 4) песчаные равнины.

Угодья скал и камней — абразионно-скульптурные формы рельефа, связанные с обнажением пластов крепко сцементированных пород и отторгнутыми от них обломками. Они формируются на месте локальных структур, испытывающих поднятие. Отпрепарированные пласты горных пород образуют банки и гряды, изгибающиеся в зависимости от простирания пластов, что определяет своеобразие рисунка угодий данного типа на ландшафтной карте (рис. 2а, условные знаки 3 и 4). Мощные рифы длиной до 20 км образуются на месте пластов бурого железняка.

Угодья скал и камней представляют особый биотоп, занятый донными биоценозами гидробионтов-обрастателей. В фитобентосе господствуют заросли бурой водорос-



Рис. 3. Фитоценоз *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata* + *Cystoseira flaccida*—*Cladostephus spongiosus* f. *verticillatus*—*Ellisolandia elongata* (*Corallina mediterranea*) — синузия эпифитов, вершина банки Аксенова, глубина 7 м (подводная фотография).

Fig. 3. Phytocoenosis *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata* + *Cystoseira flaccida*—*Cladostephus spongiosus* f. *verticillatus*—*Ellisolandia elongata* (*Corallina mediterranea*) — synusia of epiphytes, the top of Aksenov Bank, depth 7 m (underwater photography).

ли цистозир (*Cystoseira*). Зообентос образован разнообразными беспозвоночными животными, обрастающими скалы. С угодьями скал и камней связана группировка нектобентоса — рыб каменистых грунтов.

Угодья скал и камней занимают сублиторальную зону на абразионно-аккумулятивной равнине Притаманского ландшафта на глубинах до 20–25 м. Ослабление освещенности и уменьшение воздействия волн обуславливает вертикальную дифференциацию сублиторали, занимаемой угодьем скал и камней, на три этажа.

Верхний этаж от нуля глубин до 3–5 м характеризуется сообществом многолетней бурой водоросли *Cystoseira flaccida*. Под покровом водорослей на камнях в массе селится, образуя щетки, моллюск *Mytilaster lineatus*.

Средний этаж на глубине от 3–5 до 10–15 м занят пышными зарослями многолетней бурой водоросли *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata*, определяющей характерные черты типичного для Черного моря биоценоза цистозир. Биоценозы цистозир состоят из средиземноморских вселенцев, первым из которых выступает сама цистозира. На глубине до 6–7 м распространены сообщества *Treptacantha* (*Cystoseira*) *barbata*—*Clado-*

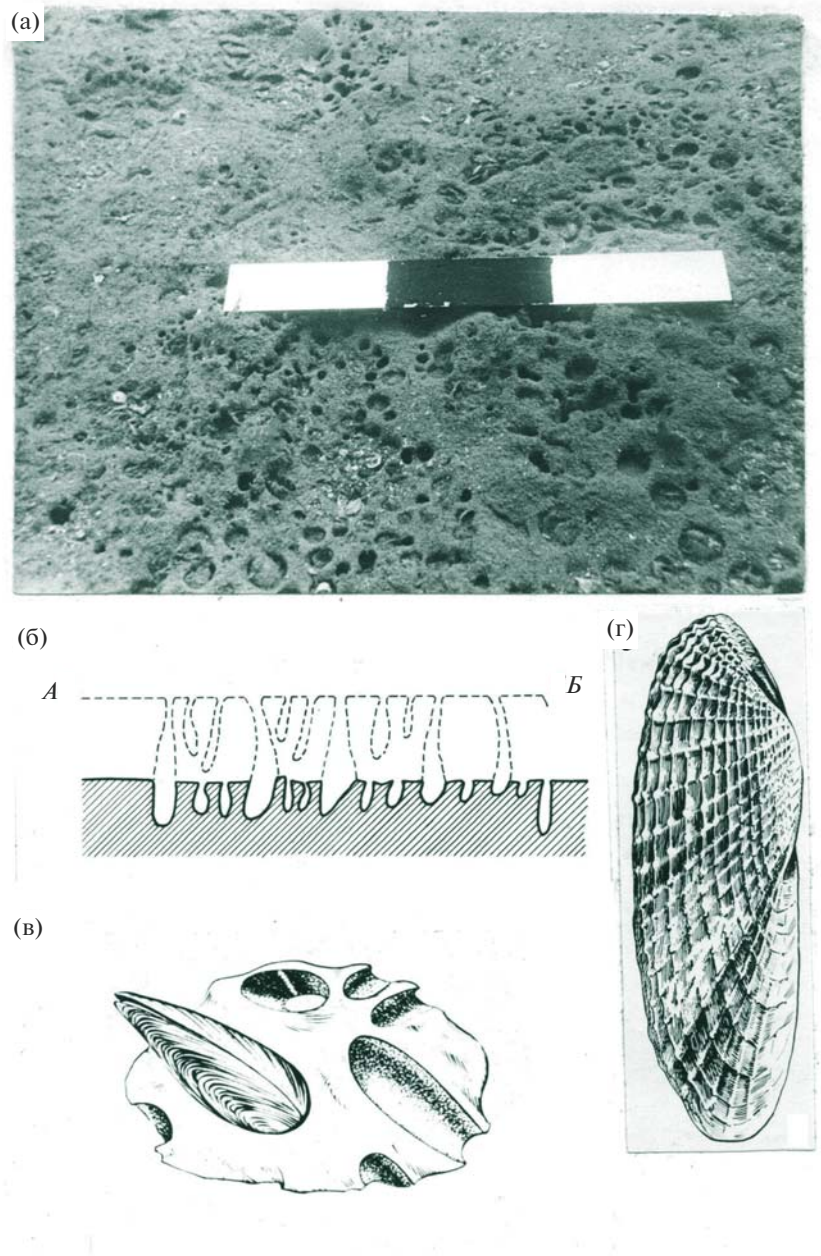
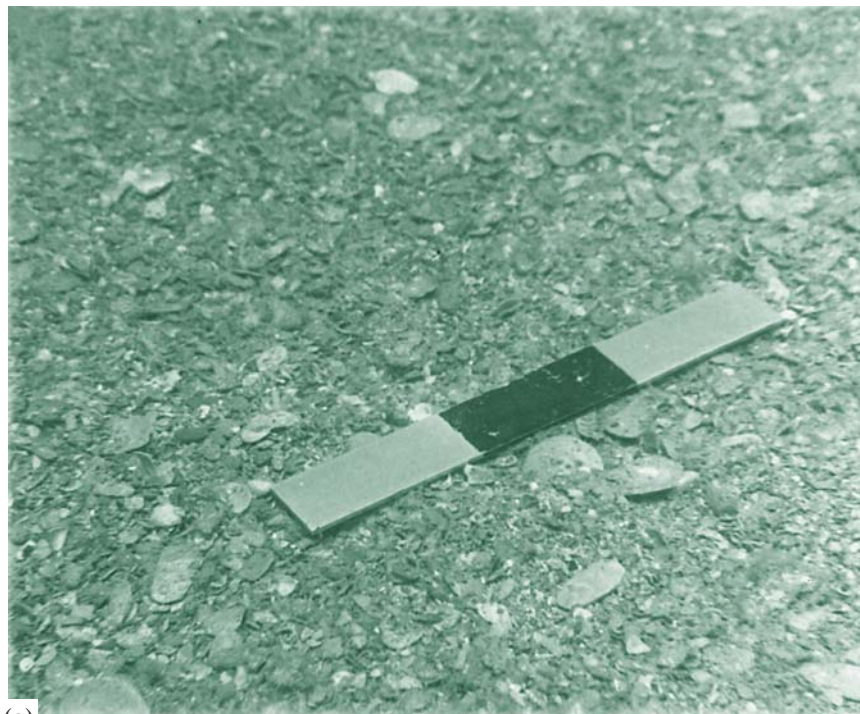


Рис. 4. Биоценоз моллюска-сверлильщика (*Pholas dactylus*): (а) ноздреватая от ходов моллюсков поверхность коренных глин, глубина 11 м (подводная фотография); (б) схема, иллюстрирующая процесс внедрения моллюсков в породу и ее разрушение (линия *АБ* — исходная поверхность); (в) моллюск-сверлильщик фолас в куске породы; (г) створка *Pholas dactylus*, хорошо видны острые сверлящие скульптурные ребра раковины.

Fig. 4. Biocoenosis of the drill shell (*Pholas dactylus*): (a) the porous surface of the clay in situ worn down by molluscs, depth 11 m (underwater photography); (b) scheme illustrating the process of introducing shells into the rock and its destruction (line *AB* is the original surface); (c) *Pholas dactylus* in the piece of rock; (r) *Pholas dactylus*, clearly visible sharp sculpted edges of the shell.



(a)



(б)

Рис. 5. Угодье полей ракуши: (а) поверхность поля ракуши на глубине около 10 м, виден характерный состав танатоценоза (подводная фотография); (б) образец грунта, поднятый драгой с глубины 10 м; видны створки мидий и устриц, а также галька и щебень коренных пород.

Fig. 5. Landform of the shell fields: (a) the surface of the shell field at a depth of about 10 m, a typical composition of thanatocoenosis is visible (underwater photography); (b) deposit's sample raised by the dredge from a depth of 10 m; mussels and oysters, as well as pebbles and gravel bedrock are visible.

stephus spongiosus f. verticillatus—*Ellisolandia elongata* (= *Corallina mediterranea*) с хорошо развитой синузией эпифитов (рис. 3). На глубине от 6–7 до 10–11 м распространены

сообщества *Treptacantha (Cystoseira) barbata*—*Phyllophora crispa*—*Gelidium spinosum* с обедненной синузией эпифитов.

Биоценоз цистозеры содержит все характерные жизненные формы зообентоса угодья скал и камней. Особая группировка связана с кронами зарослей цистозеры, это микрообро́ст (диатомовые одноклеточные водоросли, мелкие ракообразные, мелкие полихеты, личинки крупных ракообразных, моллюсков и полихет), а также эпифитные макрофиты и беспозвоночные (брюхоногие моллюски, полихеты, двустворчатые моллюски, изоподы, амфиподы и декаподы). Микрообро́ст служит фундаментом, на котором зиждется пищевая цепь всех видов животных цистозерного сообщества; его основную часть составляют диатомовые водоросли, обладающие высокой продуктивностью [5]. Формирование сессильного зообентоса происходит в процессе конкурентной борьбы за свободные каменистые поверхности. На глубинах, доступных сомкнутым зарослям водорослей, зообентос плохо развит: здесь он занимает преимущественно нижние поверхности нависающих глыб. По мере увеличения глубины плотность зарослей водорослей уменьшается и доминирующую роль на поверхности камней начинают играть сообщества обрастателей. Характер фито́бентоса средней сублиторали заметно изменяется при уменьшении приподнятости скульптурных форм над дном, сложенным рыхлыми осадками. В этом случае на поверхности каменистого субстрата образуется тонкий слой наилка, препятствующего расселению цистозеры. Подводная растительность претерпевает существенные изменения: на смену зарослям цистозеры приходят сообщества нитевидных бурых и красных водорослей с доминированием *Chondria capillaris*, *Ceramium virgatum*, *Nereia filiformis*, *Dasya baillouviana* и корковой водоросли *Zanardinia typus*.

Нижний этаж сублиторали на глубине от 10–15 до 20–25 м занят сообществом многолетней красной водоросли *Phyllophora crispa*. На подводном склоне Таманского полуострова сообщества филлофоры, в силу неблагоприятного рельефа для ее расселения, уступают место сообществам нитевидных красных водорослей *Dasya baillouviana*, *Chondria capillaris*, *Carradoriella elongata*. Здесь фито́бентос играет подчиненную роль, а фауна обрастателей занимает господствующее положение.

Угодья выходов коренных глин — скульптурные поверхности, выработанные в толще коренных глин. В Притаманском ландшафте эти угодья связаны с толщей миоцен-плиоценового возраста. Они распространены на глубине 10–15 м, образуя значительные по площади обнажения, лишенные покрова рыхлых наносов (см. рис. 2а, условный знак 5).

С глинами связан биоценоз моллюсков-сверлильщиков — фолад (*Pholas dactylus*). Поверхности выходов глин источены до такой степени, что напоминают пчелиные соты (рис. 4): на 1 м² дна приходится более 5000 отверстий, а плотность живых моллюсков достигает 2600 экз./м². Входные отверстия нор имеют разный диаметр — от 1 до 10 мм. Самые маленькие отверстия просверлены моллюсками-сеголетками. Начав сверление норы, моллюск по мере роста углубляет и расширяет ее. Достигая зрелости на третьем году жизни, моллюск имеет в поперечнике 10–12 мм и углубляет ход на 12–15 см. Таким образом, наличие на дне в породе отверстий диаметром около 10 мм указывает на то, что за 2–3 г. (срок жизни моллюска) абразией разрушен слой породы в 10–12 см (длина хода).

Угодья полей ракуши — абразионно-аккумулятивная равнина, покрытая ракушей. В Притаманском ландшафте это угодье приурочено к глубинам 10–15 м и связано с накоплением аллохтонных раковин моллюсков преимущественно мидий и устриц, обрастающих подводные скалы и камни (см. рис. 2а, условные знаки 9–11). Раковины моллюсков, обрастающих скалы, после отмирания осыпаются и разносятся волнами, образуя танатоценоз — поля ракуши на выровненных пространствах дна (рис. 5). В осадках господствуют створки целых и битых раковин и продукты их измельчения (ракушечный песок); в качестве примеси встречаются галька, щебень, гравий, песок.

Следует отметить, что образование полей ракуши происходит в условиях ограниченного поступления флювиального осадочного материала с суши. Поля ракуши образуются на глубинах, где действие волн уже сравнительно слабо для того, чтобы перемалывать раковины в песок, а с другой стороны еще настолько сильно, что проносит над ними дальше и глубже в море основную массу илистых частиц. Поля ракуши характеризуются выровненным рельефом; на отдельных участках под воздействием волн создаются формы аккумулятивного рельефа.

Как уже отмечалось, ракуша представляет танатоценоз моллюсков, обрастающих скалы и камни. Дополнительным источником раковин служат местные биоценозы. Господствующую роль в последних играют двустворчатые моллюски (*Gouldia minima*, *Divaricella divaricata*, *Pecten ponticus*, *Tapes* sp., *Venus gallina* и др.), а также брюхоногие моллюски (*Nassa*, *Cerithium*, *Gibbula*, *Rapana*, *Calyptraea*). В состав зообентоса входят также крабы *Porcellana*, *Portunus*, раки-отшельники (*Diogenes*). Поля ракуши служат стацией представителя древнейших хордовых — ланцетника *Branchiostoma* (*Amphioxus*) *lanceolata*.

Угодья песчаных равнин в Притаманском ландшафте образуются в результате аккумуляции продуктов абразии толщи песков надрудного горизонта (см. рис. 2а, условные знаки 6–8). Их внешний облик характеризуется однообразным строением, лишенным резких морфологических отличий. Затухание с глубиной воздействия волновых процессов на дно обуславливает обогащение песчаных осадков алевролитовой и пелитовой фракциями, а также автохтонным ракушечным материалом. Поступление аллохтонной ракуши происходит вблизи выходов скальных пород, на которых обитают sessильные моллюски. С угодьями песчаных равнин связан биотоп, занятый донными биоценозами псамофильных гидробионтов, обитающими на поверхности дна и закапывающимися в грунт, а также группировкой нектобентоса — рыбами песчаных грунтов. Фауна угодий песчаных равнин образована преимущественно широко распространенными и наиболее эврибионтными средиземноморскими видами.

Ослабление воздействия волн на дно обуславливает вертикальную дифференциацию сублиторали угодья песчаных равнин на три этажа.

Верхний этаж простирается до глубины 3–5 м. Характерно формирование подводных береговых валов. По дну бегают, подбирая детрит, многочисленные раки-отшельники *Diogenes pugilator*; в песок закапываются двустворчатые моллюски-фильтраторы *Donax julianae*.

Средний этаж — до глубины 10–15 м. Дно ровное с микроформами рельефа волнового происхождения, песчаные отложения мелкозернистые, слегка заиленные. На поверхности дна по-прежнему многочисленны раки отшельники, в толще песка обильны полихета-пескожил (*Arenicola marina*) и двустворчатые моллюски-фильтраторы (*Venus gallina*, *Spisula subtruncata*, *Divaricella divaricata*).

Нижний этаж протягивается до глубины 20–25 м, где воздействие волн на дно постепенно затухает. Дно ровное сложено заиленным алевроитовым песком со значительной примесью автохтонной ракуши. Бентос образован сообществами двустворчатых моллюсков-фильтраторов (*Venus gallina*, *Meretrix rudis*), возрастает роль пелофильных гидробионтов — полихет (*Nereis longissimi*, *Nephtys hombergi*).

Содержащаяся в описаниях ДПК характеристика бентоса, полученная в 1960-х гг., в настоящее время, когда Притаманский ландшафт вошел в зону активного гидротехнического строительства, может служить критерием для оценки состояния донных биоценозов и экологической обстановки в береговой зоне в целом.

ВЫВОДЫ

1. Методологической основой изучения и картографирования подводных ландшафтов служат теоретические положения географической школы В.В. Докучаева—Л.С. Берга.

2. Развитие подводного ландшафтоведения связано как с внедрением новой техники подводных исследований и дистанционного зондирования морских мелководий, так и с дальнейшей разработкой теории ландшафтов береговой зоны моря.

3. Биоцентрический подход к описанию донных природных комплексов позволяет на их основе осуществлять мониторинг экологического состояния прибрежных акваторий.

Автор выражает искреннюю благодарность старшему научному сотруднику Лаборатории экологии прибрежных донных сообществ Института океанологии им. П.П. Шишова РАН, кандидату биологических наук У.В. Симаковой за актуализацию видовых названий водорослей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалова Л.А. Экологическая диагностика и оценка устойчивости ландшафтной структуры Азовского моря. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та ООО "ЦВВР", 2006. 271 с.
2. Гурьева З.И., Петров К.М., Рамм Н.С., Шарков В.В. Геолого-геоморфологическое изучение морских мелководий и берегов по материалам аэрофотосъемки. Методическое руководство. Л.: Наука, 1968. 371 с.
3. Гурьева З.И., Петров К.М., Шарков В.В. Аэрофотометоды геолого-геоморфологического исследования внутреннего шельфа и берегов морей. Атлас аннотированных аэрофотоснимков. Л.: Недра, 1976. 227 с.
4. Гурьянова Е.Ф. Теоретические основы составления карт подводных ландшафтов // Вопросы биостратиграфии континентальных толщ. Тр. Третьей сессии Всесоюзного палеонтологического о-ва. М.: Госгеолтехиздат, 1959. С. 52–61.
5. Маккавеева Е.Б. Биоценоз *Cystoseira barbata* // Тр. Севастопольской биологической станции. Севастополь: АН СССР, 1959. Т. 12. С. 168–191.
6. Мануйлов В.А. Подводные ландшафты залива Петра Великого. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1990. 148 с.
7. Митина Н.Н., Чуприна Е.В. Подводные ландшафты Черного и Азовского морей: структура, гидроэкология, охрана. М.: Типография Россельхозакадемии, 2012. 320 с.
8. Пенно М.В. Развитие научных представлений о морских ландшафтах // Экополитика и геоэкодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 166–172.
9. Петров К.М. Рецензия на Атлас океанографических основ рыбопоисковой карты Южного Сахалина и южных Курильских островов. Т. I. Карты распределения кормовых и поисковых организмов. Л., 1955. Т. II. Карты подводных ландшафтов. Л., 1956. Отв. ред. издания Е.Н. Павловский // Изв. ВГО. 1958. № 5. С. 480–481.
10. Петров К.М. Вертикальное распределение подводной растительности Черного и Каспийского морей // Океанология. 1967. Т. 7. Вып. 2. С. 170–178.
11. Петров К.М. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. Л.: Наука, 1989. 128 с.
12. Петров К.М. Ландшафтно-биономический подход к картографированию и районированию бентали морских мелководий // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. № 1. С. 33–44.
13. Петров К.М. Развитие комплексных исследований подводных ландшафтов // Изв. РАН. Сер. геогр. 2014. № 1. С. 100–108.
14. Петров К.М. Принципы биономического районирования береговой зоны и шельфа Мирового океана // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 381–392.

The Underwater Landscape Concept

K. M. Petrov*

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: k.petrov@spbu.ru

Comprehensive study of the coastal zone of the sea is one of the urgent tasks of modern geography. Underwater landscape studies in Russia are based on the theoretical principles of the Russian geographical school of V. Dokuchaev–L. Berg. The development of marine landscape research in the XX century was facilitated by the advent of scuba diving and remote sensing. The article discusses the general points of the concept of underwater landscape, gives its definition, discusses the features of the morphological structure and the main landscape-forming factors. The landscape of the coastal zone of the sea is defined as a rela-

tively homogeneous section of the underwater coastal slope, which has the same type of geological structure, topography, deposits, hydro-climate (temperature, salinity, currents, wave processes) and similar groups of hydrobionts. It is characterized by a certain combination of intra-landscape natural complexes (facies, landforms), which are special biotopes of bottom biocoenoses. Landscapes of the coastal zone of the sea cover the coastal land exposed to surf (supralitoral), the edge of the land flooded at high tide (litoral) and the underwater coastal slope to a depth where the impact of wave processes fades and illumination is insufficient for the formation of macrophyte communities (sublitoral). The underwater landscape is considered as the main initial unit of landscape zoning of shallow sea waters. Work programs developed with these provisions in mind will ensure the completeness and comparability of research performed by different authors. The concept of an underwater landscape is illustrated by an example of the results of studying the Taman landscape in the Northeastern part of the Black Sea.

Keywords: underwater landscape, coastal zone of the sea, underwater coastal slope, bottom natural complexes, landforms, facies, supralitoral, litoral, sublitoral, Taman landscape, North-East of the Black sea

REFERENCES

1. *Bespalova L.A.* Jekologicheskaya diagnostika i ocenka ustojchivosti landshaftnoj struktury Azovskogo moray. Rostov-na-Donu: Rostov University Press OOO "CVVR", 2006. 271 s.
2. *Gur'eva Z.I., Petrov K.M., Ramm N.S., Sharkov V.V.* Geologo-geomorfologicheskoe izuchenie morskikh melkovodij i beregov po materialam ajerofotos''emki. Metodicheskoe rukovodstvo. Leningrad: Nauka, 1968. 371 s.
3. *Gur'eva Z.I., Petrov K.M., Sharkov V.V.* Ajerofotometody geologo-geomorfologicheskogo issledovaniya vnutrennego shel'fa i beregov morej. Leningrad: Nedra Publ., 1976. 228 s.
4. *Gur'yanova E.F.* Teoreticheskie osnovy sostavleniya kart podvodnyh landshaftov // Voprosy biostratigrafii kontinental'nyh tolshh. Tr. Tren'ej sessii Vsesoyuznogo paleontologicheskogo obshhestva. Moscow: Gosgeoltekhizdat Press, 1959. S. 52–61.
5. *Makkaveeva E.B.* Biocenoz *Cystoseira barbata* // Tr. Sevastopol'skoj biologicheskoy stancii. T. 12. Sevastopol': AN SSSR Publ., 1959. S. 168–191.
6. *Manujlov V.A.* Podvodnye landshafty zaliva Petra Velikogo. Vladivostok: DVGU Press, 1990. 148 s.
7. *Mitina N.N., Chuprina E.V.* Podvodnye landshafty Chernogo i Azovskogo morej: struktura, gidrojekologiya, ohrana. M.: Rossel'hozakademii Print., 2012, 320 s.
8. *Penno M.V.* Razvitie nauchnyh predstavlenij o morskikh landshaftah // Jekopolitika i geojekodinamika regionov, 2014. V. 10. № 1. S. 166–172.
9. *Petrov K.M.* Recenziya na Atlas okeanograficheskikh osnov rybopoiskovoj karty Yuzhnogo Sahalina i yuzhnyh Kuril'skikh ostrovov. T.I. Karty raspredeleniya kormovyh i poiskovyh organizmov. Leningrad, 1955. T. II. Karty podvodnyh landshaftov. Leningrad, 1956 / Otvetstvennyj redaktor izdaniya akademik E. N. Pavlovskij // Izv. VGO. 1958. № 5. S. 480–481.
10. *Petrov K.M.* Vertikal'noe raspredelenie podvodnoj rastitel'nosti Chernogo i Kaspijskogo morej // Okeanologiya, 1967. V. 7. Vyp. 2. S. 170–178.
11. *Petrov K.M.* Podvodnye landshafty: teoriya, metody issledovaniya. Leningrad: Nauka Publ., 1989. 128 s.
12. *Petrov K.M.* Landshaftno-bionomicheskij podhod k kartografirovaniyu i rajonirovaniyu bentali morskikhmelkovodij // Izv. RAN. Ser. geogr. 2003. № 1. S. 33–44.
13. *Petrov K.M.* Razvitie kompleksnyh issledovaniy podvodnyh landshaftov // Izv. RAN. Ser. geogr. 2014. № 1. S. 100–108.
14. *Petrov K.M.* Principy bionomicheskogo rajonirovaniya beregovoy zony i shel'fa Mirovogo okeana // Okeanologiya. 2020. T. 60. № 3. S. 381–392.

УНИКАЛЬНЫЕ ОЗЕРА КАК ОБЪЕКТ НАУЧНОГО ИНТЕРЕСА

© 2020 г. Ш. Р. Поздняков^{a, *}, А. В. Измайлова^{a, **}, А. М. Расулова^{a, ***}

^a Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: tbgmaster@mail.ru

**E-mail: ianna64@mail.ru

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

Поступила в редакцию 15.05.2020 г.

После доработки 04.08.2020 г.

Принята к публикации 20.08.2020 г.

По мере развития и расширения сети особо охраняемых природных территорий часто встает вопрос научного обоснования уникальности той или иной территории или акватории. На примере озерных экосистем предлагается рассмотреть возможность применения статистических подходов при таких обоснованиях. Каждая озерная экосистема по-своему своеобразна, однако для признания ее уникальности должен иметь место специфический набор свойств или характеристик, свидетельствующих об ее исключительности. В статье рассматривается вопрос о том, какие же водоемы можно признать уникальными именно с научной точки зрения. Предлагается оценивать уникальность с учетом анализа выборок, построенных по различным признакам (параметрам), характеризующим озерные экосистемы и происходящие в них процессы. По части параметров уникальные озера будут характеризоваться аномальными значениями, которые часто будут выявлены для одних и тех же единиц совокупности. Также анализируются непараметризуемые признаки, которые могут свидетельствовать об уникальности водоема, поскольку до сегодняшнего дня основным способом определения уникальности остаются экспертные оценки, отличающиеся определенной субъективностью.

Ключевые слова: озерная экосистема, уникальные озера, классификации озер, статистическая совокупность, анализ данных, поиск аномальных значений

DOI: 10.31857/S0869607120030088

ВВЕДЕНИЕ

В научно-популярной литературе в последнее время появились публикации, посвященные озерам, называемым “уникальными”. С точки зрения популяризации географии такие работы имеют значительную ценность, однако с научной точки зрения многие описываемые при этом водоемы достаточно типичны, хоть и обладают какими-либо яркими особенностями, которые чаще всего приковывают к себе внимание по субъективным признакам, прежде всего — визуальной привлекательности. В то же время критерии уникальности до сих пор точно не определены. Данный вопрос имеет значительную научную ценность, в частности, в связи с проблемой совершенствования научных основ развития и расширения сети особо охраняемых природных территорий. Цель настоящей статьи — рассмотреть возможность выявления критериев уникальности на основании анализа выборок, построенных по различным параметрам, в том числе морфометрическим. Рассмотрено, что такое озерная экосистема, как она формируется и развивается, обозначено, какие параметры свидетельствуют об экстре-

мальности среды, приводящей к ее уникальности. Рассмотрен один из возможных математических аппаратов, позволяющий проанализировать интересные параметры.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Озером называется котловина или впадина земной поверхности, заполненная или периодически заполняемая водой, не имеющая непосредственной связи с океаном и характеризующаяся замедленным водообменом [17, с. 5]. Озера образуются в том случае, когда приток вод в котловину превосходит потери воды на испарение, фильтрацию и отток. Однако прежде должна образоваться сама озерная котловина, возникновение которой может быть связано с деятельностью эндогенных или, чаще, экзогенных процессов, в ряде случаев с их последовательным воздействием. Сформировавшаяся котловина постепенно заполняется водой, поступающей с водосбора. Ее химический состав формируется благодаря целому комплексу факторов, среди которых подстилающие горные породы, почвы, атмосферные осадки, подземные воды, живые организмы. Появившиеся в различные периоды геологической истории и сформировавшиеся в разнообразных природных условиях озера обретают свой гидрологический, гидрохимический и термический режимы и постепенно населяются всевозможными живыми организмами. Совокупность всех обитающих в водоеме живых организмов, связанных между собой потоками вещества и энергии и окружающей их неживой среды обитания, образует озерную экосистему. При этом не существует абсолютно одинаковых по своему химическому составу вод и полностью идентичных друг другу экосистем, каждая из которых отличается набором характерных лишь ей внутренних свойств и характеристик. Однако при всем своем многообразии, сформировавшиеся в схожих условиях озерные экосистемы обычно обладают значительным сходством. На основе сходства элементов по конкретным основаниям строятся их классификации. Среди существующего множества классификаций озер наибольший интерес представляют те, которые отражают закономерности формирования, структуры, функционирования озера как целостной геосистемы. Здесь можно привести классификации озер по происхождению котловин [13, 15, 27, 32, 38 и др.], их морфометрическим особенностям [4, 9, 10 и др.], водному балансу и внешнему водообмену [5], особенностям термического режима [22, 24, 28, 41, 42 и др.], типу минерализации и химическому составу воды [1, 2, 19 и др.], гидробиологическим показателям, учитывающим таксономическую структуру и характеристику озер по преобладающему распространению в них определенных водных организмов [6, 23, 25, 35 и др.].

На фоне большинства озер, характеризующихся сходством по целому ряду параметров, всегда находятся водоемы, которые отличаются экстремальными характеристиками — наиболее древние, глубокие, обладающие чрезвычайной степенью расчлененности берегов, аномальным температурным режимом, крайними значениями минерализации воды, необычным соотношением между величинами концентраций различных ионов, наличием повышенных количеств каких-либо специфических компонентов газового или солевого составов, отличающиеся крайней продуктивностью, высоким видовым разнообразием или эндемизмом флоры и фауны. Благодаря своим резко отличным характеристикам такого рода озера могут рассматриваться как уникальные. Таким образом, каждая озерная экосистема по-своему своеобразна, однако для признания ее уникальности она должна характеризоваться неким специфическим набором свойств или характеристик (часто экстремальных), свидетельствующих об ее исключительности.

Другими словами, если все озера мира представить, как статистическую совокупность с набором признаков (параметров), характеризующих сами озерные экосистемы и происходящие в них процессы, то большинство выборок, построенных по этим параметрам на основе данных реальных измерений, может быть описано с помощью

теоретического распределения вероятностей. При этом по многим выборкам оно будет близко к нормальному, как наиболее часто встречающемуся в природе, с положительной или отрицательной асимметрией. В то же время по части параметров будут наблюдаться “выбросы”, резко выделяющиеся из общей выборки. Так как для озерных экосистем характерна взаимная обусловленность происходящих в них процессов, эти “выбросы” часто будут выявлены для одних и тех же единиц совокупности, то есть для озер, имеющих аномальные значения по целому ряду характеристик. При этом аномальные значения по одному признаку могут приводить к “выбросам” еще по целому ряду параметров. С позиции статистики именно такие озера и следует рассматривать как уникальные. Следует уточнить, что в данной работе под “выбросом” понимается “элемент маломощного подмножества выборки, существенно отличающийся от остальных элементов выборки” [7, с. 1]. В тоже время априори предполагается, что статистическая совокупность данных не содержит ошибок измерений. Следовательно, в данном случае можно говорить, что “выбросы” совпадают с аномалиями данных.

Поскольку происхождение озерной котловины в значительной степени определяет главные типические особенности озера, наряду с рассмотрением генеральной совокупности всех озер мира, имеет смысл оценивать статистические совокупности озер с общим происхождением. Как указывал А.Г. Исаченко, генетические особенности геосистем — происхождение, возраст, пути развития — находят косвенное отражение в их современных структурно-динамических и функциональных свойствах, вплоть до чисто внешних, геометрических черт [20, с. 10]. В связи с этим именно такой подход был выбран нами при первичном анализе, который будет продемонстрирован в рамках настоящей статьи.

Как известно, происхождение преобладающего большинства озерных котловин связано с экзогенными процессами, что в значительной мере определяет их относительную молодость. Котловин, образованных тектоническими движениями земной коры, а также сейсмическими и вулканическими процессами, крайне мало. Согласно [29, с. 124], на их долю приходится лишь несколько процентов числа мировых озер. В то же время, поскольку энергия земных недр, если она высвобождается, чаще всего намного превосходит энергию внешних по отношению к Земле сил, то среди наиболее крупных и глубоких водоемов мира абсолютно преобладают озера, занимающие котловины тектонического и вулканического происхождения (с учетом того, что часть из них в дальнейшем подверглась ледниковой экзарации). Огромные размеры озерных котловин во многом обуславливают совершенно иное протекание в них целого ряда лимнических процессов, что обычно проявляется при попытках сравнения информации, полученной по крупнейшим озерам, с остальными водоемами Земли. Благодаря этому крупнейшие озера часто выделяют в особый вид водных объектов, что позволяет охарактеризовать значительную часть из них как уникальные. Еще А.Г. Исаченко указывал, что крупные озера, такие как Байкал, Ладожское, могут представлять собой уникальные водоемы, сопоставимые по своим размерам и внутренней структуре с региональными геосистемами различных рангов. Они практически не находят себе место в ландшафтных классификациях и в ландшафтном (физико-географическом) районировании, что вряд ли можно считать нормальным [20, с. 14]. Многие крупнейшие озера характеризуются и наиболее древним возрастом котловин, который для большинства рифтовых водоемов оценивается от 25 до 2 млн лет, а у котловин остальных тектонических озер исчисляется сотнями тысяч лет. Экстремальные по ряду параметров размеры котловины, сочетающиеся с древним возрастом и высочайшей степенью эндемизма флоры и фауны, бесспорно, свидетельствуют об уникальности таких водоемов.

Так, не вызывает сомнения уникальность самого глубокого и вместительного пресноводного водоема суши — оз. Байкал. Возраст котловины озера традиционно определяется в 25–35 млн лет. В озере насчитывается более 2628 видов и подвидов животных,

из которых 56% являются эндемиками [21, с. 24], а также 1085 видов и разновидностей растений, из которых эндемичны 6 родов, 133 вида и 62 разновидности [3, с. 32].

Оз. Танганьика является самым длинным и вторым по глубине и объему заключенной пресной воды озером мира. Это старейшее из озер Восточно-Африканского рифта, возраст которого оценивается разными авторами от 7 до 20 млн лет. В водах Танганьики обитает 2156 представителей флоры и фауны, среди которых около 600 видов — эндемики [30, с. 157].

Одним из 20 древнейших озер на Земле является Ньяса, четвертое по объему заключенной пресной воды. Для озера характерна богатая, высоко эндемичная фауна. Согласно данным Программы ООН по окружающей среде, в озере насчитывается около 500 видов рыб, эндемичных на 90%. Так как многие виды не описаны, ряд специалистов указывает, что в озере обитает около 1000 разновидностей рыб [31, с. 9, 33, с. 126].

Бесспорно, уникальным является и оз. Восток (76° – 78° южной широты), перекрытое ледяным щитом толщиной 3600–4350 м. Его водное зеркало не горизонтально как в обычных озерах, а находится под наклоном порядка шести угловых минут [16, с. 29]. Возраст оценивается в 35 млн лет [8, с. 816]. Экосистема озера уникальна тем, что находилась в изоляции от земной поверхности на протяжении сотен тысяч лет.

Специального упоминания заслуживают озера, возникающие в вулканических регионах. Наряду с многократно встречающимися аномальными морфометрическими характеристиками, многие из них характеризуются чрезвычайным разнообразием химического режима. В активных кратерах действующих вулканов часто находятся кислые термальные, в той или иной степени минерализованные озера. Источником воды, тепла и растворенных компонентов в них являются атмосферные осадки, внутрикратерные термальные источники и субаквальные фумарольные выходы [36, с. 532]. Для таких кратерноозерных водных масс характерны самые различные и специфические, отличающиеся от таковых в других типах озер физико-химические и гидрологические процессы. В аномальных гидрохимических и гидротермических условиях формируются и особые водные биоценозы, приспособленные к кислой воде.

Интересны озера зоны недостаточного увлажнения, отличающиеся аномальной соленостью. Среди наиболее крупных высоко минерализованных озер мира — расположенное в долине р. Иордан Мертвое море (соленость 270–310‰, в нижнем слое — до 400‰), и лежащее в Афарской котловине оз. Ассаль (350–400‰). В России крупнейшими соляными водоемами являются оз. Эльтон (200–500‰, в частности, 468‰ по данным измерений ИНОЗ РАН 12.08.2019) и оз. Баскунчак (около 300‰, 360‰ по данным измерений ИНОЗ РАН 16.08.2019). Котловины российских озер образованы между крупными соляными куполами, что придает уникальность геосистемам, включая их прибрежную часть.

Возникшие в определенных природных условиях озера обретают свой гидрологический и термический режим, чаще всего отражающий эти условия и характерный для водоемов данной природной зоны. Тем не менее в ряде случаев их режим может резко отличаться от большинства находящихся рядом озер. Особым гидротермическим режимом характеризуются водоемы, расположенные в регионах фумарольной и гидротермальной активности. Значительное влияние на особенности протекания гидрологических и гидротермических процессов могут оказывать и другие местные факторы (специфика подземного питания, морфометрические особенности котловины и др.). В этом случае водоемы будут выпадать по термическому или гидрологическому режиму из своей климатической зоны, что скажется на происходящих в них биологических процессах и может резко выделить такие озера по целому ряду параметров. Здесь очень важно sobлюсти различия между атипичностью (наблюдающейся у озер с характеристиками, резко выделяющимися в данных географических условиях, но при этом распространенными в мировом масштабе) и уникальностью (когда определенные характеристики действительно крайне редки). В этой связи представляется, что

предлагаемый в рамках настоящего исследования анализ выборок, построенных по различным параметрам, может облегчить данную задачу.

Также уникальными могут быть признаны и целые группы малых водоемов, как например, карстовые Голубые озера в Кабардино-Балкарии или лежащие в окружении травертина Плитвицкие озера в Хорватии. Оз. Церик-Кель, входящее в группу Голубых озер, обладает аномальным соотношением глубины (279 м) к площади водной поверхности (2 га) [12, с. 92]. Особенностью Плитвицких озер выступает постоянное изменение системы соединяющих их водопадов, связанное с непредсказуемостью поведения травертина [26, с. 21]. Есть основания утверждать, что предлагаемый нами метод поможет выделить также и другие группы малых водоемов.

Наряду с показателями, характеризующими необычные условия среды обитания, особый интерес представляет уникальность озерных экосистем, признаваемая благодаря специфике населяющих ее организмов. Озерные экосистемы различаются по видовому разнообразию, продуктивности, степени эндемичности населяющей их флоры и фауны. Согласно [14], видовое разнообразие складывается из видового богатства, или плотности видов, которое характеризуется общим числом имеющихся видов, а также из их выравненности, основанной на относительном обилии или другом показателе значимости вида и положении его в структуре доминирования. Для оценки специфики структурно-функциональной организации сообществ гидробионтов с учетом видовой плотности и выравненности часто используется индекс Шеннона [37, 39]. Также используется индекс Симпсона [40], оценивающий разнообразие на основе подсчета связности между внутренними элементами экосистемы, обеспечивающей ее единство и функционирование. В отличие от уникальных условий абиотической среды, относительно легко вычисляемых при анализе характеризующих ее показателей, оценка уникальности биоценоза представляется более сложной. Она может быть достаточно легко определена при экстремальной продуктивности водоема, чрезвычайном видовом разнообразии или высокой степени эндемичности биоты. Оценка биоценозов по степени сложности их организации менее очевидна и, несмотря на наличие индексов, характеризующих разнообразие, пока недостаточно параметризована.

Таким образом, предлагаемый подход к определению уникальности за счет анализа выборок позволяет выделить озера, характеризующиеся экстремальными значениями лишь по ряду измеряемых параметров (морфометрические показатели, температурные характеристики, минерализация, кислотность, продуктивность и др.), в то время как далеко не все происходящие в озерах процессы могут быть параметризованы. Кроме того, на сегодняшний день количество лимнологически изученных озер крайне невелико. Поэтому необходимо признать, что важнейшим способом определения уникальности остаются экспертные оценки, на уровне которых могут быть выявлены дополнительные признаки, свидетельствующие о возможности рассматривать озеро как уникальное. Применение статистических методов позволяет алгоритмизировать процесс, внести научное обоснование в выборки, а также выявить новые водоемы, которые в дальнейшем могут более подробно анализироваться на предмет уникальности их экосистем.

ПРИМЕР ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИЗ РЯДА МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для примера проанализируем статистические характеристики морфометрических параметров некоторых озер, представленных в разработанной в Институте озераведения РАН базе WORDLAKE [18]. На начальном этапе рассмотрим озера, котловины которых имеют тектоническое происхождение. Как уже указывалось выше, к этой группе относится большинство наиболее глубоких и древних водоемов мира. В процессе анализа выяснено, что наиболее крупные озера являются аномалиями, сильно

Таблица 1. Описательная статистика морфометрических показателей тектонических озер. Пояснения в тексте
Table 1. Descriptive statistics of morphometric indicators of tectonic lakes. Explanations are at the text

Морфометрический показатель	Кол-во объектов	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартная ошибка среднего	Стандартное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Стандартная ошибка асимметрии	Экссесс	Стандартная ошибка эксцесса
L , км	577	0.05	1.2×10^3	30.111	3.500	84.071	7.067×10^3	8.023	0.102	85.010	0.203
W , км	545	0.01	435	10.894	1.160	27.071	732.840	9.078	0.105	121.507	0.209
S , км ²	685	5×10^{-4}	3.864×10^5	1.273×10^3	5.84×10^2	1.528×10^4	2.336×10^8	23.684	0.093	592.544	0.187
L , км	446	0.12	6×10^3	137.378	20.299	428.687	1.837×10^5	8.217	0.116	90.797	0.231
H_{avg} , м	439	0.1	740	19.924	2.766	57.959	3359.246	7.711	0.117	76.632	0.233
H_{max} , м	541	0.15	1.65×10^3	41.713	5.369	124.871	1.559×10^4	8.531	0.105	91.243	0.210
V , км ³	435	4.35×10^{-9}	7.87×10^5	314.848	193.977	4.045×10^3	1.636×10^7	17.473	0.117	329.489	0.234
C , км ²	321	0.14	3.66×10^6	4.713×10^4	1.528×10^4	2.737×10^5	7.49×10^{10}	10.138	0.136	116.050	0.271
H_{max}^*	719	9.09×10^{-5}	1	1.9×10^{-2}	2.48×10^{-3}	6.653×10^{-2}	4.427×10^{-3}	9.704	0.091	118.956	0.182
H_{avg}^*	719	1.3×10^{-4}	0.987	1.62×10^{-2}	2.3×10^{-3}	6.173×10^{-2}	3.811×10^{-3}	9.689	0.091	122.037	0.182
c	424	0.033	0.918	0.464	6.847×10^{-3}	0.141	1.988×10^{-2}	-0.015	0.119	-0.274	0.237
H^{**}	533	1.6×10^{-5}	0.13	1.51×10^{-2}	9.857×10^{-4}	2.276×10^{-2}	5.179×10^{-4}	2.236	0.106	5.500	0.211
k_s	544	2.857×10^{-2}	1	0.527	1.136×10^{-2}	0.265	7.023×10^{-2}	0.256	0.105	-0.851	0.209
S^*	685	1.3×10^{-9}	1.001	3.3×10^{-3}	1.513×10^{-3}	3.96×10^{-2}	1.568×10^{-3}	23.684	0.093	592.545	0.187
V^*	435	2.29×10^{-11}	1	4×10^{-3}	2.465×10^{-3}	5.141×10^{-2}	2.643×10^{-3}	17.473	0.117	329.5	0.234

влияющими на форму распределения. Поэтому они были исключены из выборки, что позволило более детально оценить ее остальные элементы.

Так как размерные характеристики (L – длина озера (км), W – его ширина (км), S – площадь (км²), l – длина береговой линии (км), h – глубина (м), V – объем (км³), C – площадь водосбора (км²)) имеют большой разброс значений, будем, как это предлагается в [11], рассматривать безразмерные характеристики, полученные по формулам:

$$H_{\max}^* = \frac{H_{\max}}{H_{\max B}}, \quad (1)$$

$$H_{\text{avg}}^* = \frac{H_{\text{avg}}}{H_{\text{avg B}}}, \quad (2)$$

$$c = \frac{H_{\text{avg}}}{H_{\max}}, \quad (3)$$

$$H^{**} = 10^{-3} \frac{H_{\max}}{\sqrt{S}}, \quad (4)$$

$$k_s = \frac{W}{L}, \quad (5)$$

$$S^* = \frac{S}{S_{\text{KS}}}, \quad (6)$$

$$V^* = \frac{V}{V_{\text{KS}}}, \quad (7)$$

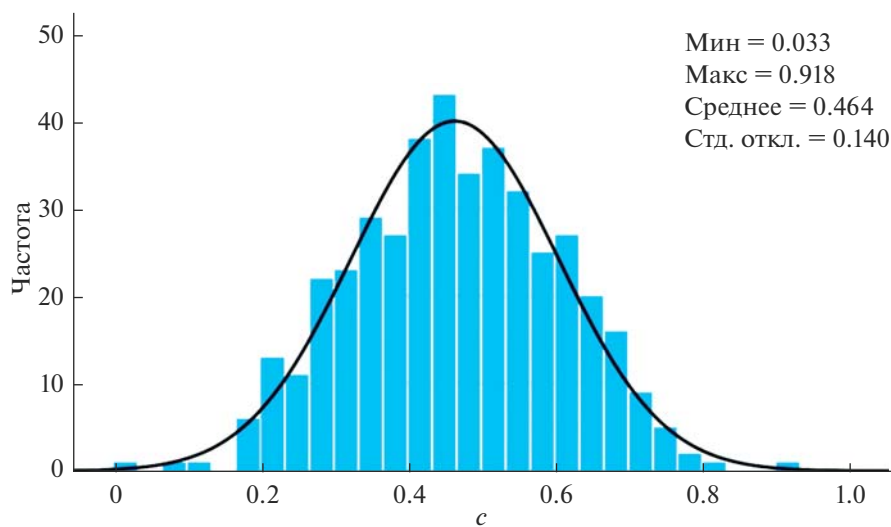
где $H_{\max}^*$ – безразмерная максимальная глубина, H_{avg}^* – безразмерная средняя глубина, c – коэффициент формы котловины озера, H^{**} – относительная глубина, (соотношение между вертикальным и горизонтальным масштабом озера), k_s – коэффициент сжатия, отвечающий за форму озера в горизонтальной плоскости, S^* – безразмерная площадь озера, V^* – безразмерный объем озера, $H_{\text{avg B}}$, $H_{\max B}$ – средняя и максимальная глубины озера Байкал, S_{KS} , V_{KS} – площадь и объем Каспийского моря.

Анализ характеристик (табл. 1) показывает, что формы распределений имеют преимущественно асимметричный вид, аналогично общей совокупности. Исключение составляет, например, коэффициент формы озерной котловины c , зависящий от средней и максимальной глубины. Значения асимметрии и эксцесса находятся в интервалах $-1 < A < 1$ и $-3 < E < 3$ соответственно, что характерно для нормального распределения. Была произведена проверка нулевой гипотезы: наблюдаемое распределение коэффициента формы озерной котловины тектонических озер не отличается от теоретически ожидаемого нормального распределения. Проверка производилась с помощью теста Колмогорова–Смирнова с поправкой Лилефорса. Поскольку вероятность справедливости данной гипотезы P больше 0.05 ($P = 0.200$), следовательно, анализируемое распределение не отличается от нормального. Гистограмма наблюдаемых значений с кривой нормального распределения приведена на рис. 1, основные статистические показатели – в табл. 2.

Также близкой к нормальному является форма распределения коэффициента сжатия k_s , который отвечает за форму озера в горизонтальной плоскости. Анализ остальных морфометрических характеристик выборки указывает на наличие асимметрии, смещенной в область малых значений, которая лучше всего описывается гамма-распределением.

Таблица 2. Описательная статистика коэффициента формы озерной котловины тектонических озер**Table 2.** Descriptive statistics of the shape factor of the tectonic lakes basin

Статистические характеристики	Значения статистических характеристик для коэффициента формы озерной котловины c
Количество объектов	424
Диапазон	0.884
Минимум	0.033
Максимум	0.918
Среднее	0.464
Стандартная ошибка среднего	0.006
Стандартное отклонение	0.145
Дисперсия	0.020
Асимметрия	−0.015
Стандартная ошибка асимметрии	0.119
Экссесс	−0.274
Стандартная ошибка эксцесса	0.237

**Рис. 1.** Гистограмма коэффициента формы озерной котловины (c) с кривой нормального распределения.**Fig. 1.** Histogram of the lake basin shape factor (c) with a bell curve.

На рис. 2а представлен Q–Q график (или квантиль-квантильный), который отображает квантили распределения переменной по сравнению с квантилями теоретического распределения. Из него следует, что в области малых и больших значений есть наблюдения, отклоняющиеся от нормального. Более наглядно это показано на безтрендовом Q–Q графике (рис. 2б). Также данный график нагляден с точки зрения поиска “выбросов” или аномальных значений. Экстремальные отклонения от нулевой линии находятся не более чем на ± 0.04 стандартных отклонения, что не подпадает под “выбросы”. Тем не менее можно говорить, что тектонические озера в области малых

($c < 0.2$) и больших ($c > 0.7$) значений формы озерной котловины имеют наибольшие отклонения от нормального закона распределения, делая его более плосковершинным.

Если говорить о “выбросах” и аномальных значениях, то наглядно их можно увидеть на диаграмме размаха (называемой также диаграмма “ящик с усами”) (рис. 3). На оси абсцисс отложена переменная, а на оси ординат — стандартизованные оценки коэффициента формы озерной котловины c . Высота прямоугольника на диаграмме соответствует значениям от первого до третьего квартиля, а горизонтальная линия внутри прямоугольника — медиана. “Усы” диаграммы отвечают за максимальные и минимальные значения. Кружки находящиеся выше “верхнего уса” или ниже “нижнего уса” соответствуют “выбросам” с числом порядкового номера объекта в выборке.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Необходимо отметить, что на большинстве диаграмм размаха, построенных нами для проведенных выборок морфометрических характеристик озер, присутствовали многочисленные “выбросы”, влияющие на форму распределения. Интересно, что даже при первичном анализе выбросов лишь по некоторым морфометрическим характеристикам мы получили список озер, многие из которых характеризуются как уникальные и на уровне экспертных оценок. Так, среди водоемов, выявленных при анализе диаграмм размаха по большинству параметров, приводимых в табл. 1, прежде всего обращают на себя внимание такие озера, как Охридское (выявлено по диаграммам размаха морфометрических признаков $L, W, S, I, H_{avg}, H_{max}, V$ как “выброс”) — самое глубокое и древнее на Балканском полуострове, с уникальной водной экосистемой, включающей более 200 эндемиков, и оз. Тонлесап (выявлено по диаграммам размаха морфометрических признаков $L, W, S, I, H_{avg}, H_{max}, V$ как “выброс”) — самый большой водоем п-ова Индокитай, характеризующийся аномальными колебаниями площади, связанными с ежегодным разливом во время сезона дождей и являющийся одним из наиболее рыбопродуктивных пресноводных водоемов мира. “Выбросами” на приведенной диаграмме размаха (рис. 3) для коэффициента формы (c) являются соленые озера Симби на западе Кении (северо-восточнее оз. Виктория) и Тонхил Нуур на юго-западе Монголии, из которых оз. Симби включено в одноименный национальный заповедник (Lake Simbi National Sanctuary). Озеро представляет собой небольшой по площади (0.29 км²), глубокий (25 м) щелочной высокопродуктивный водоем с хорошо выраженным хемоклином [34] и является одним из важнейших резерватов водно-болотных птиц Рифтовой долины.

Представляется, что предложенный нами подход к оценке уникальности за счет анализа выборок позволит вычленивать не только крайние (в большинстве случаев максимальные) значения какого-либо параметра, но и значения, резко выпадающие из выборки, что особенно важно в силу множественности локальных систем малого размера, которые лишь при таком подходе могут быть выделены. Другими словами, это дает возможность вычленивать также и группы небольших озер (скорее всего расположенных в аналогичных экстремальных условиях), которые в силу каких-либо причин по ряду параметров резко отличаются от других водоемов данного ранга. Еще раз необходимо подчеркнуть, что выявление уникальных озер еще долго будет опираться на экспертные оценки; в то же время внедрение предложенного в настоящей статье подхода по анализу выборок может рассматриваться как крайне перспективное направление исследований, сосредоточенных на совершенствовании научных основ обоснования особо охраняемых природных территорий.

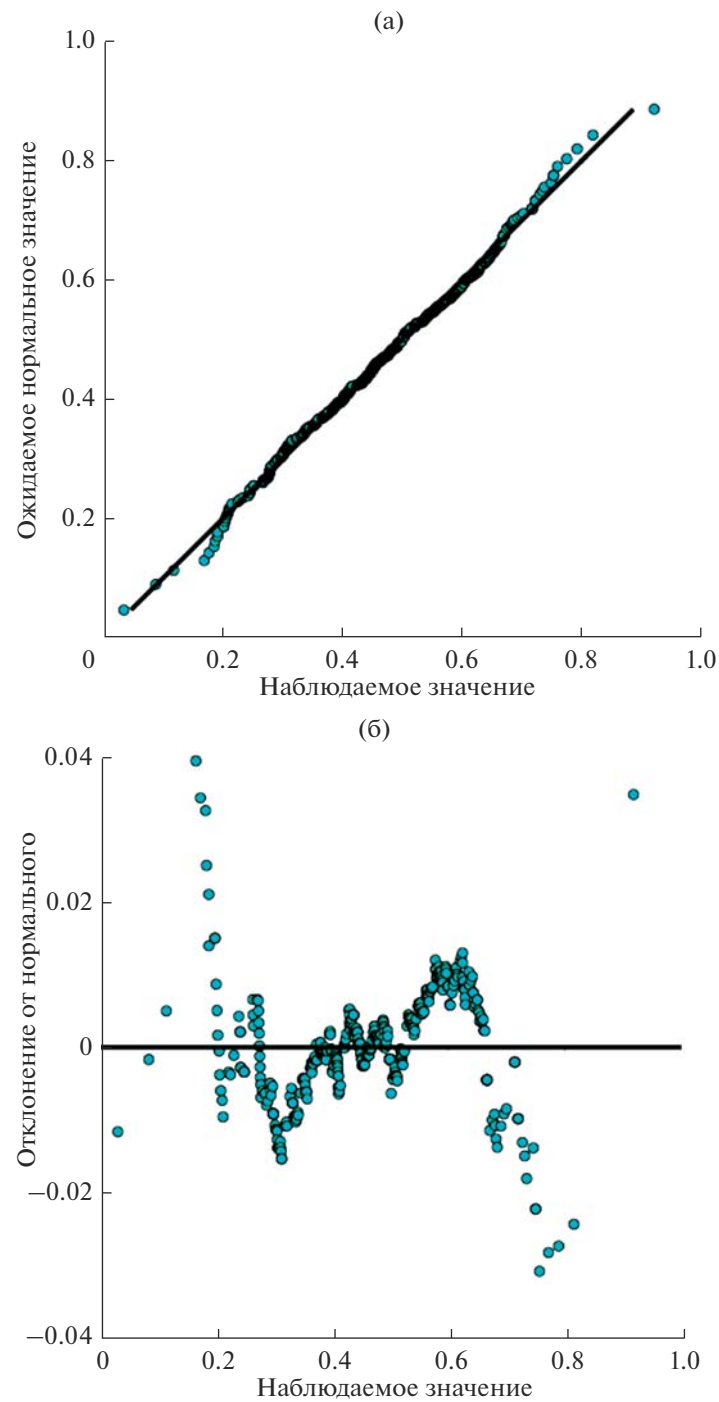


Рис. 2. Квантиль-квантильный график (а) и бестрендовый квантиль-квантильный график (б) для коэффициента формы озерной котловины тектонических озер (с).

Fig. 2. Quantile-quantile plot (a) and trendless quantile-quantile plot (б) for the shape factor of the tectonic lakes basin (с).

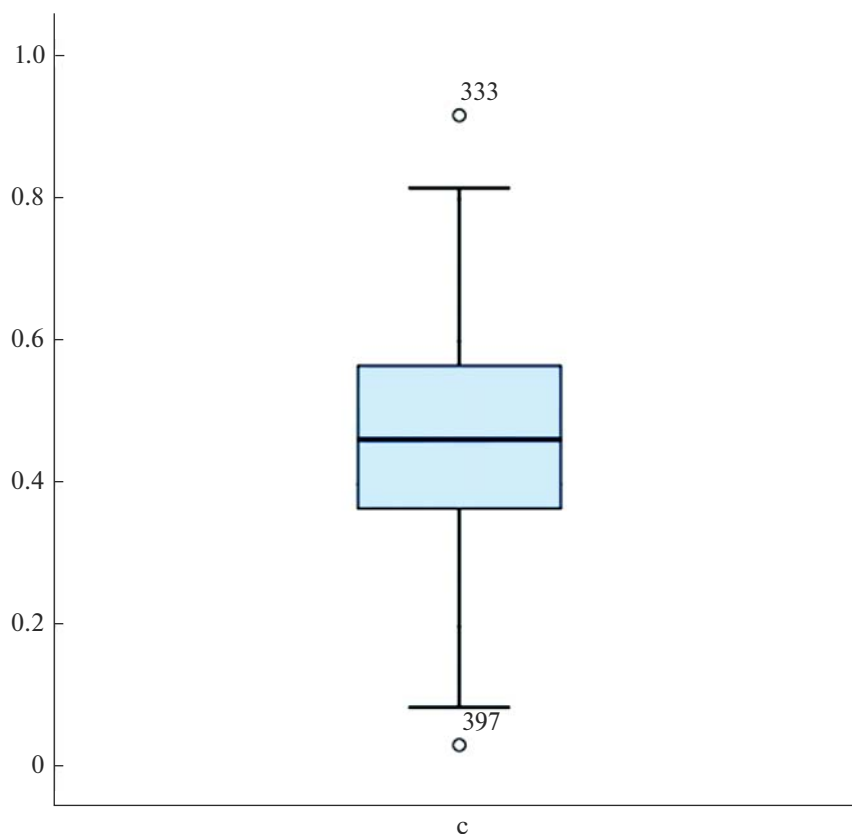


Рис. 3. Диаграмма размаха для коэффициента формы озерной котловины c .

Fig. 3. Box-and-whisker plot for the shape factor of the lake basin (c).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, надо отметить, что выявление уникальных озер наряду с распространенной на настоящий момент экспертной оценкой может опираться и на статистический аппарат. С этой целью авторами статьи предлагается проводить анализ выборок, построенных по различным параметрам, характеризующим озерные экосистемы и происходящие в них процессы. При этом, прежде всего, необходимо ориентироваться на абиотические характеристики экосистемы, и уже отталкиваясь от степени их экстремальности, анализировать сложившиеся в данных условиях биоценозы. Первые шаги в этом направлении нами уже сделаны и требуют дальнейшего продолжения. Более подробный анализ позволит не только вычленивать новые уникальные озера, но и определить, рассмотрение каких параметров наиболее перспективно. Безусловно, требуется определение оптимального механизма выявления “выбросов” при анализе выборки, и для этого необходим значительно больший объем исследований. Перспективность выбранного пути не вызывает сомнений.

Важность алгоритмизации выявления уникальных природных объектов очевидна в связи со сложностью обоснования отнесения той или иной территории к категории особо охраняемых, что достаточно часто имеет место. Поэтому предлагаемый в рамках настоящей статьи анализ выборок параметров, характеризующих озерные экосисте-

мы, может представлять значительный интерес и при изучении других природных объектов. Кроме того, анализ механизмов, происходящих в экстремальных по каким-либо параметрам условиях, которые и позволяют характеризовать озеро как уникальное, имеет важное значение для развития лимнологии, предоставляя дополнительный материал для изучения и понимания процессов, происходящих в озерных экосистемах. Расширение наших общих представлений об особенностях их функционирования позволяет вывести исследования водных ресурсов планеты на новый уровень.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 20-05-00303/20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёкин О.А. К вопросу о химической классификации природных вод // Вопросы гидрохимии. Тр. НИУ ГУГМС. 1946. Сер. 4. Вып. 32. С. 25–39.
2. Баранов И.В. Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 276 с.
3. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: учебное пособие. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2009. 291 с.
4. Богданов В.В. Зонально-региональные свойства лимногенеза и их роль в классификации и районировании озер // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. Л.: Изд-во АН СССР. Геогр. общество СССР, 1984. С. 71–78.
5. Богословский Б.Б., Филь С.А. Классификация водоемов по внешнему водообмену // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. М.: Изд-во АН СССР. Геогр. общество СССР, 1984. С. 54–60.
6. Винберг Г.Г. Значения новых методов лимнологического исследования для разработки типологии озер // Тр. V научной конференции по изучению внутренних вод Прибалтики. Минск, 1959. С. 5–13.
7. ГОСТ Р ИСО 16269-4–2017. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2017. 49 с.
8. Зотиков И.А., Даксбери Н.С. О генезисе озера Восток: Антарктида // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 6. С. 815–818.
9. Иванов П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36.
10. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер различных природных зон. М.: Наука, 1984. 208 с.
11. Кочков Н.В., Рянжин С.В. Методика оценки морфометрических характеристик озер с использованием спутниковой информации // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 1–6.
12. Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю., Демнев А.Д. Уникальность карстового озера Церик-Кель (Голубое озеро) в Кабардино-Балкарии // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Петрозаводск, 2017. С. 92–98.
13. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология. М.: Высшая шк., 1991. 368 с.
14. Одум Ю. Экология. В 2-х томах. М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с. Т. 2. 376 с.
15. Пармузин Ю.П. Генетическая классификация озерных котловин и схема районирования СССР по их родам // Кружоворот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 106–114.
16. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф // Лед и снег. 2011. Вып. 1(113). С. 25–35.
17. Румянцев В.А., Дракцова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России. СПб.: Лема, 2015. 480 с.
18. Рянжин С.В. Создание WORLDLAKE – базы данных по озерам и водохранилищам мира для широких лимнологических исследований: Всерос. Юбил. конф. РФФИ Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы. М.: Макс Пресс, 2002. С. 239–240.
19. Сулин В.А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод. М.–Л.: Изд. АН СССР, 1948. 108 с.
20. Теоретические вопросы классификации озер / Отв. ред. Н.П. Смирнова. СПб.: Наука, 1993. 186 с.
21. Тимошкин О.А. Озеро Байкал: разнообразие фауны, проблемы ее несмешиваемости и происхождения, экология и “экзотические” сообщества // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна. Новосибирск: Наука, 2001. Т. 1, кн. 1. С. 16–73.
22. Тихомиров А.И. Классификация озер умеренной зоны по термическому режиму // Всесоюзный Симпозиум по основным проблемам пресноводных озер. Вильнюс, 1970. Т. 1. С. 174–185.
23. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. V. 22(2). P. 361–369.
24. Forel F.-A. Le Leman. Monographie limnologique. Lausanne: F. Rouge, 1904. V. 3. 715 p.

25. Hansen K. The dystrophic lake type // *Hydrobiologia*. 1962. V. 19. P. 183–191.
26. Horvatinčić N. Starost sedre Plitvičkih jezera // *Priroda: mjesečnik za popularizaciju prirodnih znanosti i ekologije*. 1999. V. 89. P. 20–22.
27. Hutchinson G.E. A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1957. 1015 p.
28. Hutchinson G.E., Löffler H. The thermal classification of lakes // *Proceedings of the National Academy Sciences of the USA*. 1956. V. 42(2). P. 84–86.
29. Kalff J. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. N.Y.: Prentice Hall, 2002. 593 p.
30. *Lake Tanganyika and its Life*. London: Oxford University Press, 1991. 354 p.
31. Msukwa A. Ecological Aspects of the Ornamental Fish of Lake Malawi and their Implications in Relation to Exploitation and Conservation // *Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium*. Malawi, 2001. P. 9–10.
32. Murray J., Pullar L. *Bathymetrical Survey of the Scottish Fresh-Water Lochs*. Edinburgh: Chalmers Office, 1910. 658 p.
33. Ngatunga B. The need to maintain maximum biodiversity in Lake Nyasa, lessons drawn from other biodiversity disaster // *Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium*. Malawi, 2001. P. 6.
34. Ochumba P.B.O., Kibaara D.I. An instance of thermal instability in Lake Simbi, Kenya // *Hydrobiologia*. 1988. V. 158. P. 247–252.
35. Ohle W. Beiträge zur Produktionsbiologie der Gewässer // *Archiv für Hydrobiologie, Suppl.* 1955. V. 22(3/4). P. 456–479.
36. Pasternack G.B., Varecamp J.C. Volcanic lake systematics I. Physical constraints // *Bull. of Volcanology*. 1997. V. 58. № 7. P. 528–538.
37. Pielou E.C. Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and measure // *Amer. Natur.* 1966. V. 100. P. 463–465.
38. Schwoerbel J. *Handbook of Limnology*. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1987. 228 p.
39. Shannon C.E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.
40. Simpson E.H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949. V. 163. 688 p.
41. Whipple G.C. Classifications of lakes according to temperature // *American Naturalist*. 1898. V. 32. P. 25–33.
42. Yoshimura S.A. A contribution to the knowledge of deep water temperature of Japanese lakes. Pt.1. Summer temperature Japan // *J. Astronomy & Geophysics*. 1936. V. 13. P. 20–61.

Unique Lakes as an Object of Scientific Interest

Sh. R. Pozdnyakov^{1, *}, A. V. Izmailova^{1, **}, and A. M. Rasulova^{1, ***}

¹*Institute of Limnology RAS, Saint Petersburg, Russia*

*e-mail: tbgmaster@mail.ru

**e-mail: ianna64@mail.ru

***e-mail: arasulova@gmail.com

As the network of specially protected natural areas develops and expands, the question of scientific substantiation often arises: is it possible to characterize this or that territory or water area as “unique”. Using the example of lake ecosystems it is proposed to consider the possibility of applying statistical approaches to such justification. Each lake ecosystem is different in its own way, however, in order to recognize its uniqueness, there must be a specific set of properties or characteristics indicating its exceptional nature. The article discusses the question of what kind of lakes can be considered as unique from a scientific perspective. It has been proposed to evaluate the uniqueness taking into account the analysis of samples constructed according to various characteristics (parameters) characterizing the lake ecosystems and the processes occurring in them. If all the lakes of the world are presented as a statistical aggregate with a set of characteristics (parameters) characterizing the lake ecosystems themselves and the processes occurring in them, then most of the samples built on these parameters based on real-world data can be described using theoretical distributions. At the same time, several parameters will have outliers that stand out drastically from the complete sample. Since the lake ecosystems are characterized by mutual dependence of the processes occurring in them, these outliers will be detected generally for the same units of the sample, i.e. for lakes that have abnormal values in a number of characteristics. At the same time, extreme values for one characteristic (parameter) can lead to the emergence of outliers in a

number of parameters. These lakes should be considered as unique in terms of a statistics. This approach allows to distinguish not only the extreme values of any parameter, but also the values drastically standing out of the sample. It is especially important due to the multiplicity of small local lake systems which can be distinguished only with this approach. The article also analyzes non-parameterizable features that may indicate the uniqueness of the lake, since to this day expert assessments remain the main way to determine uniqueness, although it must be recognized that they have a certain subjectivity.

Keywords: lake ecosystem, unique lakes, lake classifications, statistical aggregate, data analysis, outlier

REFERENCES

1. *Alyokin O.A.* K voprosu o himicheskoy klassifikacii prirodnyh vod // Voprosy gidrohimii. Tr. NIU GUGMS. 1946. Ser. 4. Vyp. 32. S. 25–39.
2. *Baranov I.V.* Limnologicheskie tipy ozyor SSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1962. 276 s.
3. *Berkin N.S., Makarov A.A., Rusinek O.T.* Bajkalovedenie: uchebnoe posobie. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo gos. un-ta, 2009. 291 s.
4. *Bogdanov V.V.* Zonal'no-regional'nye svoystva limnogeneza i ih rol' v klassifikacii i rajonirovanii ozyor // Geografo-gidrologicheskij metod issledovaniya vod sushi. L.: Izd-vo AN SSSR. Geogr. obshchestvo SSSR, 1984. S. 71–78.
5. *Bogoslovskij B.B., Fil' S.A.* Klassifikaciya vodoyomov po vneshnemu vodoobmenu // Geografo-gidrologicheskij metod issledovaniya vod sushi. M.: Izd-vo AN SSSR. Geogr. obshchestvo SSSR, 1984. S. 54–60.
6. *Vinberg G.G.* Znacheniya novyh metodov limnologicheskogo issledovaniya dlya razrabotki tipologii ozyor // Tr. V nauchnoj konferencii po izucheniyu vnutrennih vod Pribaltiki. Minsk, 1959. S. 5–13.
7. GOST R ISO 16269-4–2017. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. M.: Standartinform, 2017. 49 s.
8. *Zotikov I.A., Daksberi N.S.* O genezise ozera Vostok: Antarktida // Dokl. RAN. 2000. V. 370. № 6. S. 815–818.
9. *Ivanov P.V.* Klassifikaciya ozyor po velichine i po ih srednej glubine // Byul. LGU. 1948. № 21. S. 29–36.
10. *Kitaev S.P.* Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozyor razlichnyh prirodnyh zon. M.: Nauka, 1984. 208 s.
11. *Kochkov N.V., Ryzanzhin S.V.* Metodika ocenki morfometricheskikh harakteristik ozer s ispol'zovaniem sputnikovoj informacii // Vodnye resursy. 2016. V. 43. № 1. S. 1–6.
12. *Maksimovich N.G., Meshcheryakova O.Yu., Demenev A.D.* Unikal'nost' karstovogo ozera Cerik-Kyol' (Goluboe ozero) v Kabardino-Balkarii // Ozyora Evrazii: problemy i puti ih resheniya. Petrozavodsk, 2017. S. 92–98.
13. *Mihajlov V.N., Dobrovol'skij A.D.* Obshchaya gidrologiya. M.: Vysshaya shk., 1991. 368 s.
14. *Odum Yu.* Ekologiya. V 2-h tomah. M.: Mir, 1986. V. 1. 328 s. V. 2. 376 s.
15. *Parmuzin Yu.P.* Geneticheskaya klassifikaciya ozyornyh kotlovin i skhema rajonirovaniya SSSR po ih rodam // Krugovorot veshchestva i energii v ozyornyh vodoyomah. Novosibirsk: Nauka, 1975. S. 106–114.
16. *Popov S.V., Masolov V.N., Lukin V.V.* Ozero Vostok, Vostochnaya Antarktida: moshchnost' lednika, glubina ozyora, podlyodnyj i korennoj rel'ef // Lyod i sneg. 2011. Vyp. 1(113). S. 25–35.
17. *Rumyancev V.A., Drabkova V.G., Izmajlova A.V.* Ozyora evropejskoj chasti Rossii. SPb.: Lema, 2015. 480 s.
18. *Ryzanzhin S.V.* Sozdanie WORLDLAKE – bazy dannyh po ozeram i vodohranilishcham mira dlya shirokih limnologicheskikh issledovanij: Vseros. Yubil. konf. RFFI Fundamental'nye issledovaniya vzaimodejstviya sushi, okeana i atmosfery. M.: Maks Press, 2002. S. 239–240.
19. *Sulin V.A.* Usloviya obrazovaniya, osnovy klassifikacii i sostav prirodnyh vod. M.–L.: Izd. AN SSSR, 1948. 108 c.
20. Teoreticheskie voprosy klassifikacii ozyor / Otv. red. N.P. Smirnova. SPb.: Nauka, 1993. 186 s.
21. *Timoshkin O.A.* Ozero Bajkal: raznoobrazie fauny, problemy eyo nesmeshivaemosti i proiskhozhdeniya, ekologiya i "ekzoticheskie" soobshchestva // Annotirovannyj spisok fauny ozera Bajkal i ego vodosbornogo bassejna. Novosibirsk: Nauka, 2001. V. 1, kn. 1. S. 16–73.
22. *Tihomirov A.I.* Klassifikaciya ozyor umerennoj zony po termicheskomu rezhimu // Vsesoyuznyj Simpozium po osnovnym problemam presnovodnyh ozyor. Vil'nyus, 1970. V. 1. S. 174–185.
23. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. V. 22(2). P. 361–369.
24. *Forel F.-A.* Le Lemman. Monographie limnologique. Lausanne: F. Rouge, 1904. V. 3. 715 p.
25. *Hansen K.* The dystrophic lake type // Hydrobiologia. 1962. V. 19. P. 183–191.

26. *Horvatinčić N.* Starost sedre Plitvičkih jezera // *Priroda: mjesečnik za popularizaciju prirodnih znanosti i ekologije.* 1999. V. 89. P. 20–22.
27. *Hutchinson G.E.* A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1957. 1015 p.
28. *Hutchinson G.E., Löffler H.* The thermal classification of lakes // *Proceedings of the National Academy Sciences of the USA.* 1956. V. 42(2). P. 84–86.
29. *Kalff J.* Limnology: Inland Water Ecosystems. N.Y.: Prentice Hall, 2002. 593 p.
30. *Lake Tanganyika and its Life.* London: Oxford University Press, 1991. 354 p.
31. *Msukwa A.* Ecological Aspects of the Ornamental Fish of Lake Malawi and their Implications in Relation to Exploitation and Conservation // *Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium.* Malawi, 2001. P. 9–10.
32. *Murray J., Pullar L.* Bathymetrical Survey of the Scottish Fresh-Water Lochs. Edinburgh: Challenger Office, 1910. 658 p.
33. *Ngatunga B.* The need to maintain maximum biodiversity in Lake Nyasa, lessons drawn from other biodiversity disaster // *Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium.* Malawi, 2001. P. 6.
34. *Ochumba P.B.O., Kibaara D.I.* An instance of thermal instability in Lake Simbi, Kenya // *Hydrobiologia.* 1988. V. 158. P. 247–252.
35. *Ohle W.* Beitrage zur Produktionsbiologie der Gewasser // *Archiv fur Hydrobiologie, Suppl.* 1955. V. 22(3/4). P. 456–479.
36. *Pasternack G.B., Varecamp J.C.* Volcanic lake systematics I. Physical constraints // *Bull. of Volcanology.* 1997. V. 58. № 7. P. 528–538.
37. *Pielou E.C.* Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and measure // *Amer. Natur.* 1966. V. 100. P. 463–465.
38. *Schwoerbel J.* Handbook of Limnology. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1987. 228 p.
39. *Shannon C.E., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.
40. *Simpson E.H.* Measurement of diversity. *Nature.* 1949. V. 163. 688 p.
41. *Whipple G.C.* Classifications of lakes according to temperature // *American Naturalist.* 1898. V. 32. P. 25–33.
42. *Yoshimura S.A.* A contribution to the knowledge of deep water temperature of Japanese lakes. Pt.1. Summer temperature Japan // *J. Astronomy & Geophysics.* 1936. V. 13. P. 20–61.

**ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МАЛЫХ ОЗЕР КАРЕЛИИ
(РАСЧЕТЫ НА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ FLAKE)**

© 2020 г. Н. И. Пальшин^{a, *}, Т. В. Ефремова^{a, **}, Г. Э. Здоровеннова^{a, ***},
Г. Г. Гавриленко^{a, ****}, Р. Э. Здоровеннов^{a, *****},
А. Ю. Тержевик^{a, *****}, С. Р. Богданов^{a, *****}

^aИнститут водных проблем Севера ФИЦ “Карельский научный центр РАН”, Петрозаводск, Россия

*E-mail: npalshin@mail.ru

**E-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

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

****E-mail: gg.gavrylenko@gmail.com

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

*****E-mail: ark1948@list.ru

*****E-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Поступила в редакцию 21.08.2020 г.

После доработки 20.09.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

По результатам расчетов на одномерной численной модели FLake изучена изменчивость термического режима малых (площадью менее 5 км²) разнотипных озер Карелии в разные по погодным условиям годы (1999–2012 гг.). Рассмотрена реакция температуры, толщины и теплозапаса поверхностного перемешанного слоя озер в период максимального прогрева их водной толщи (вторая декада июля) на погодные условия холодного 2007 г. и аномально жаркого 2010 г. В жаркий год прирост температуры поверхностного слоя в “цветных” озерах заметно выше, чем в прозрачных. При этом глубина перемешанного слоя сокращается наиболее заметно в глубоких прозрачных озерах. В жаркий год теплозапас поверхностного перемешанного слоя в эпи- и метатермических “цветных” и прозрачных озерах увеличивается, а в гипотермических — уменьшается. Численные расчеты показали, что при росте прозрачности наиболее выраженное увеличение глубины поверхностного слоя и его теплозапаса наблюдается в глубоких прозрачных водоемах, по сравнению с “цветными” эпи- и метатермическими. При возможных климатических изменениях испарения и поступления в озера растворенных веществ с водосборов можно ожидать наиболее выраженных изменений в термическом режиме именно глубоких прозрачных озер.

Ключевые слова: малое озеро, термический режим, температура воды, коэффициент экстинкции, модель FLake, верхний перемешанный слой

DOI: 10.31857/S0869607120030052

ВВЕДЕНИЕ

Изучение термогидродинамики водоемов суши — важная задача современной лимнологии. Термический режим и режим перемешивания оказывают существенное влияние на развитие водных экосистем [13], определяют газовый режим водоемов, включая образование аноксии и эмиссию парниковых газов [15, 21, 32], а следовательно, определяют качество воды и рекреационную ценность озер. Водоемы суши, как неотъемлемая часть подстилающей поверхности, вносят определенный вклад во взаимо-

действие с пограничным слоем атмосферы через потоки тепла, влаги и импульса. Современные модели климата и численного прогноза погоды включают параметризацию термогидродинамики малых озер для учета их влияния на характеристики и структуру атмосферного пограничного слоя [26].

В течение последних десятилетий происходят глобальные климатические изменения [22]. По результатам масштабных исследований показано, что температура поверхности озер умеренной зоны повышается на фоне наблюдаемых изменений климата [14, 27], в том числе в озерах Карелии [1]. Модельные расчеты показывают, что при существующем сценарии изменения климата в ближайшем будущем возможны коренные изменения режима перемешивания небольших озер умеренного пояса: полимиктические водоемы могут стать димиктическими, а димиктические — мономиктическими [10], что будет иметь отрицательное влияние на их кислородный режим [19] и функционирование озерных экосистем в целом.

Режим перемешивания озер умеренной зоны определяется рядом факторов: длиной разгона ветра [28], площадью зеркала и гравитационной устойчивостью вод [20], особенностями строения озерной котловины [12], а также географической широтой и высотой над уровнем моря, оказывающими влияние на термическую стратификацию [9]. Режим перемешивания малых озер с площадью поверхности менее 5 км² контролируется также прозрачностью воды, глубиной озера, степенью залесенности берегов [16, 25].

При изучении термического режима малых озер и особенностей их перемешивания в период открытой воды все шире применяются методы математического моделирования. Одной из основных особенностей малых озер выступает горизонтальная однородность температурного поля и преобладание процессов вертикального теплообмена, что позволяет с успехом применять одномерные модели при изучении их теплового режима и режима перемешивания [23, 24, 30, 31].

Территория Карелии характеризуется высокой озерностью (около 12%, а с учетом Ладожского и Онежского озер — до 21%) — общее количество озер превышает 61 тыс., при этом основное число озер — это малые водоемы с площадью менее 5 км² [6]. Проблема изучения термогидродинамики малых водоемов особенно актуальна для разных ландшафтов этого региона. В рамках исследований по государственной теме “Роль гидрофизических процессов в экосистемах мелководных озер. Процессы переноса и перемешивания в годовом цикле” для изучения особенностей гидродинамики небольших водоемов Карелии используется одномерная численная модель FLake [17], описывающая вертикальную термическую структуру и условия перемешивания в озерах во временном масштабе от нескольких часов до нескольких лет. Она основана на двухслойной параметризации профиля температуры и кинетической энергии для этих слоев.

Цель данной работы — исследовать изменчивость термического режима малых озер Карелии, расположенных в разных ландшафтах при переменной прозрачности воды в разные по погодным условиям годы методами математического моделирования (по результатам расчетов на одномерной численной модели FLake).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ

При изучении термического режима малых водоемов Карелии использовалась одномерная модель FLake [17], описание которой приведено в работе [26]. Расчеты проводились для малых озер Вендюрской группы (юг Карелии) и озера Заонежья (рис. 1), морфометрические характеристики которых (Z — высота над уровнем моря, F — площадь поверхности, V — объем вод, $h_{\text{ср}}$ и $h_{\text{макс}}$ — средняя и максимальная глубины соответственно) приведены в табл. 1. Озеро Вендюрское использовалось для тестовых расчетов на модели и не учитывалось в анализе термического режима озер с площадью менее 5 км², поскольку его площадь превышает 10 км².

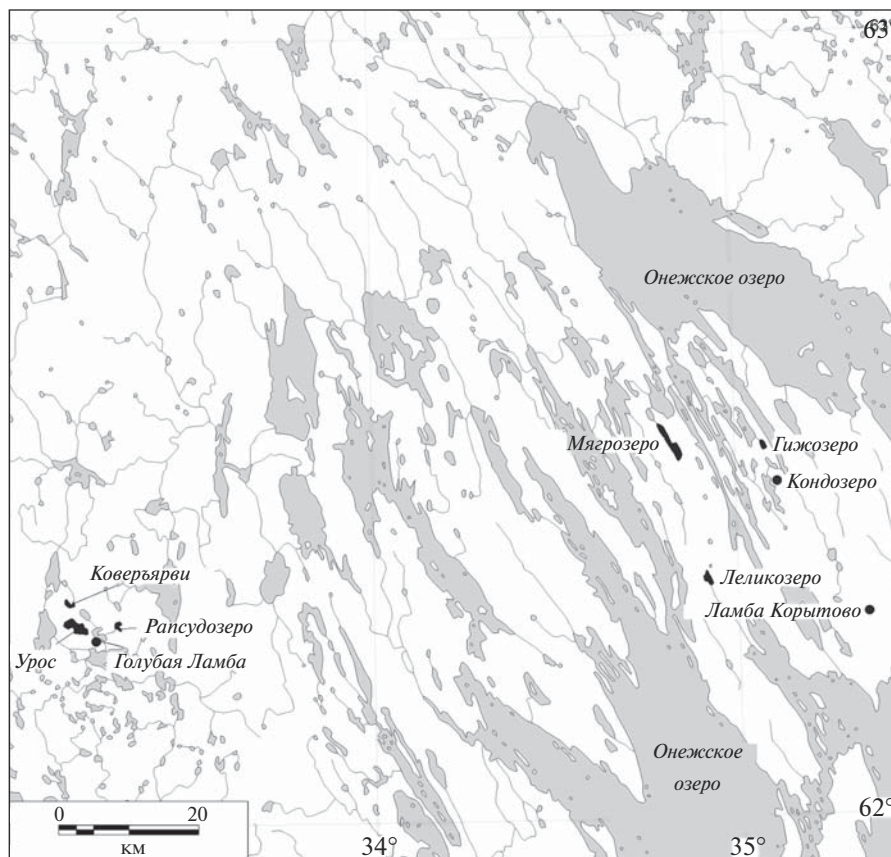


Рис. 1. Положение модельных озер на карте Карелии. Ламбы Голубая и Корытово и оз. Кондозеро обозначены пунсонами.

Fig. 1. Position of model lakes on the map of Karelia. Lamba Golubaya, Lamba Korytovo and Lake Kondozero are marked with markers.

Исследуемые малые водоемы расположены в двух типах ландшафта таежной зоны: озера Вендюрской группы — в пределах ландшафта Вохтозерской ледораздельной возвышенности, а выбранные для анализа озера Заонежья — в Заонежском сельговом ландшафте. Данные группы озер различаются по физико-географическим и лимническим характеристикам (табл. 1). Озера находятся практически на одной широте, при этом абсолютные высоты озер Вендюрской группы на 50–80 м больше рассматриваемых озер Заонежья. Вендюрские озера неглубокие: максимальные глубины в них достигают 8.0–9.5 м; озера Заонежской группы более глубокие (максимальные глубины — 8.8–19.0 м). Кондозеро (максимальная глубина — 19 м) — типичный представитель гипотермических озер. Остальные озера этой группы относятся, как и Вендюрские озера, к метатермическому типу, но придонный слой в них стратифицирован. Результаты анализа характеристик водосборов (заболоченности, лесистости) и проточности выбранных озер Вендюрской группы и Заонежья и их связи с оптическими показателями водной толщи этих водоемов приведены в работе [8].

При расчетах на модели FLake для каждого водоема задавались следующие характеристики: географическая широта, средняя глубина озера, длина разгона ветра, коэф-

Таблица 1. Географические и морфометрические характеристики модельных озер Карелии по [6]. Пояснения в тексте**Table 1.** Geographic and morphometric characteristics of model lakes in Karelia according to [6]. Explanations are in the text

Группа озер	Название озера	φ° с.ш.	λ° в.д.	Z , м	F , км ²	V , млн. м ³	$h_{\text{ср}}$, м	$h_{\text{макс}}$, м
Вендюрская группа	Урос	62.2520	33.1869	147.8	4.36	11.5	2.6	9.5
	Голубая Ламба	62.2376	33.2371	145	0.039	0.166	4.2	8.0
	Рапсудозеро	62.2525	33.2958	147.9	0.91	3.0	3.4	8.4
	Коверъярви	62.2836	33.1700	143.2	0.88	2.2	2.5	4.2
	Вендюрское	62.1254	33.1550	143.8	10.4	55	5.3	13.4
Заонежская группа	Мягрозеро	62.4779	34.8267	63.4	4.95	28	5.6	9.9
	Леликозеро	62.3036	34.9212	86.4	1.6	9.2	5.7	13
	Гижозеро	62.4742	35.0827	60.5	0.49	2.55	5.2	10
	Кондозеро	62.4264	35.1158	100.3	0.18	1.36	7.6	19
	Ламба Корытово	62.2569	35.3573	(72.5)	0.003	0.014	4.4	8.8

фициент экстинкции воды (γ), глубина термически активного слоя донных отложений и температура на его нижней границе.

Батиметрия озер была задана по данным справочника Озера Карелии [6] и работы [11]. Оценки коэффициента экстинкции выполнены в соответствии с методикой, изложенной в работе [8]. Длина разгона ветра, вычисленная как половина сумм длины и ширины акватории, изменялась для модельных озер от 0.006 до 3.6 км. Глубина термически активного слоя донных отложений принята для всех озер равной 5 м в соответствии с натурными измерениями на оз. Красном, расположенном на Карельском перешейке [3, 18]. Температура на нижней границе теплоактивного слоя донных отложений зависит от глубины озер и их географической широты. Для ее оценки, в соответствии с подходом, предложенным в работе [26], была рассчитана среднесезонная температура водной толщи оз. Вендюрского за период с июля 2007 г. до июня 2013 г. по данным круглогодичных измерений температуры на автономной станции в центральной глубоководной части этого озера [33]. Эта температура в модельных расчетах принята равной 7.2°C для всех озер Вендюрской группы и озер Заонежья.

Для оценки применимости принятых допущений в модели FLake для озер южной Карелии был выполнен численный расчет годового цикла температуры озера Вендюрского в 10 вариантах: при задании средней (5.5 м) и максимальной (11 м) глубин, при значениях коэффициентов экстинкции воды 0.8, 1.0 и 1.2 м⁻¹ и двух вариантах задания длины разгона ветра (4.2 км — среднее значение между длиной и шириной озера, 6.2 км — с учетом долинного эффекта). Для верификации расчетов использовались данные натурных измерений температуры воды на 15 горизонтах центральной вертикали (термодатчики TR-1060 RBR Ltd, точность по температуре 0.002°C, дискретность датчиков по глубине от 0.1 до 1.5 м, интервал измерений — 1 мин) в период 2007–2013 гг. [33]. Сравнение результатов расчетов с данными натурных измерений показало, что модель FLake хорошо описывает температуру поверхностного перемешанного слоя (для разных вариантов расчета коэффициент детерминации составил 0.97–0.98, среднеквадратическое отклонение — 1.1–1.8°C), его глубину, дату установления в озере гомотермии во второй половине лета, а также сроки ледовых событий.

Для каждого из девяти модельных озер Вендюрской и Заонежской групп был получен годовой ход температуры воды. Поскольку одномерная модель не учитывает форму строения озерной котловины и то, что максимальные глубины озер могут быть в 2–4 раза больше их средних значений, были проведены дополнительные расчеты для максимальной глубины каждого из озер. При этом для самого большого по площади

оз. Мягрозера и самого глубокого оз. Кондозера расчеты были выполнены для 4 вариантов значений коэффициента экстинкции — 0.3, 0.5, 1.0, 1.9 м⁻¹. Таким образом, получено 30 вариантов расчетов для модельных озер, отличающихся в широких пределах по глубине и прозрачности. Расчеты были выполнены с шагом в одни сутки для периода с 1999 по 2012 г.

Для расчетов на модели FLake необходимы следующие метеорологические параметры: солнечная радиация (Вт/м²), температура воздуха (°C), абсолютная влажность воздуха (мб), скорость ветра (м/с), облачность (в долях единицы). В расчетах для озер Вендюрской группы использовались данные по метеостанции Петрозаводск, а для озер Заонежья — по метеостанции Медвежьегорск. По этим метеорологическим станциям, расположенным на расстоянии 50–70 км от модельных озер, имеются доступные данные на сервере “Погода России” за период с 1999 по 2012 гг. [10]. Величина потока солнечной радиации при безоблачном небе вычислялась в зависимости от высоты Солнца в соответствии с моделью Лаборатории имитационного моделирования [4]. Суммарная солнечная радиация рассчитывалась с учетом общей облачности по восьми срочным наблюдениям в сутки на метеостанциях. Для введения поправки на влияние облачности была предложена формула, полученная в результате аппроксимации данных, приведенных в [7]:

$$Q_n = Q_0 \cos(1.483(N - 0.22) \cos(0.497h)), \quad n = 81, \quad R^2 = 0.967, \quad (1)$$

где Q_0 — солнечная радиация при безоблачном небе (Вт/м²), N — общая облачность в долях от 0 до 1, h — высота Солнца (углы в радианах). Формула (1) справедлива для $N > 0.2$. При $N \leq 0.2$ принималось, что $Q_n \approx Q_0$ [7].

Для самых малых по площади лесных ламб Корытово и Голубая суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная), достигающая их поверхности, была рассчитана с учетом затенения лесом части акватории. В обоих случаях высота леса и берегов была принята равной 20 м. Прямая солнечная радиация достигает более половины поверхности ламбы Корытово при $\sin h \geq 0.5$ и более половины поверхности Голубой ламбы при $\sin h \geq 0.2$. Доли прямой радиации в утренние и вечерние часы при меньших значениях углов высоты Солнца не учитывались, но были сохранены доли рассеянной радиации. Для всего годового цикла вычислены коэффициенты снижения возможной солнечной радиации для обеих ламб, которые были использованы в расчетах: для Голубой ламбы с марта по сентябрь — 0.92–0.97, с октября по февраль — 0.5; в меньшей по площади ламбе Корытово в мае–июле — 0.80–0.82, с августа по апрель — 0.5–0.7. Определенное влияние на скорость ветра над акваторией малых озер могут оказывать берега и лес при длине разгона ветра меньше 20-кратной их высоты. Поэтому для малых ламб скорость ветра в расчетах была уменьшена в 10 раз. Для озер с большими площадями зеркала этими эффектами пренебрегали.

При обобщении большого количества данных, полученных в результате расчетов на модели FLake, нас, в первую очередь, интересовали интегральные (количественные) характеристики: температура воды в поверхностном перемешанном слое (ППС) в период, близкий к максимальному прогреву и глубина этого слоя (наличие стратификации в озерах). На озерах южной Карелии в середине августа при смене направления результирующего потока тепла на границе вода-атмосфера наблюдается полное перемешивание метатермических озер [6]. В отдельные годы это происходит раньше, поэтому в дальнейшем анализе использовались данные за вторую декаду июля.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температура ППС. Результаты численных экспериментов показали, что температура ППС в малых озерах во второй декаде июля нелинейно связана с коэффициентами экстинкции (рис. 2а) и зависит от глубины озер (рис. 2б). Чем прозрачнее и глубже озеро, тем меньше температура ППС. Во второй декаде июля различия по температуре

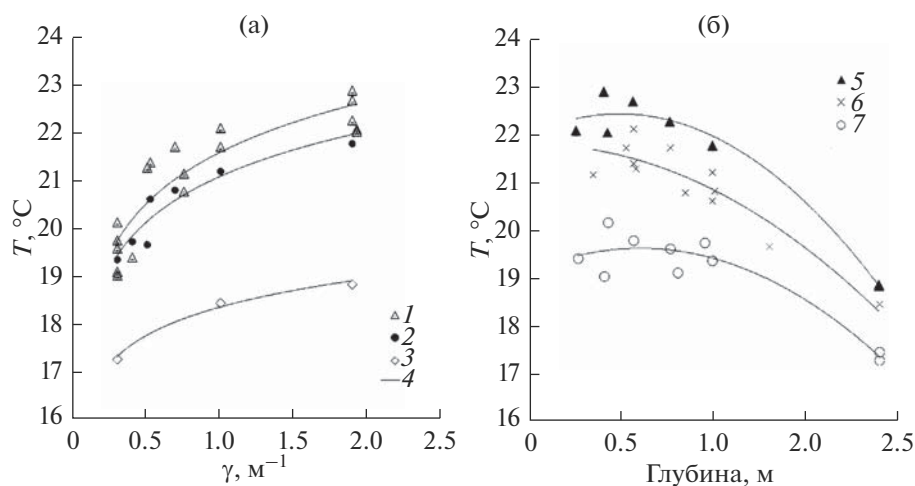


Рис. 2. а – зависимость температуры воды ППС от коэффициента экстинкции γ в разнотипных озерах южной Карелии во второй декаде июля: 1 – эпитептермические, 2 – метатермические, 3 – гипотермические озера, 4 – нелинейная аппроксимация данных. б – зависимость температуры воды ППС озер с разными коэффициентами экстинкции от глубины озер: 5 – озера с повышенной цветностью воды (γ от 1.85 до 1.93 м^{-1}), 6 – озера с пониженной цветностью воды (γ от 0.5 до 1.0 м^{-1}), 7 – прозрачные озера (γ от 0.3 до 0.4 м^{-1}).

Fig. 2. а – dependence of the water temperature of the surface mixed layer on the extinction coefficient γ in different types of lakes of southern Karelia in the second decade of July: 1 – epithermal, 2 – metathermal, 3 – hypothermic lakes, 4 – nonlinear data approximation. б – dependence of the water temperature of the surface mixed layer of lakes with different extinction coefficients on the depth of lakes: 5 – lakes with increased water color (γ from 1.85 to 1.93 m^{-1}), 6 – lakes with low water color (γ from 0.5 to 1.0 m^{-1}), 7 – transparent lakes (γ from 0.3 to 0.4 m^{-1}).

воды ППС в разнотипных водоемах южной Карелии могут достигать 5–6°C. В эпитептермических (глубины от 2.5 до 8.8 м) и метатермических (глубины от 4 до 13 м) озерах при изменении коэффициентов экстинкции от 0.3 до 2.0 м^{-1} температура ППС увеличивается на ~3°C (рис. 2а). В глубоких (19 м) гипотермических озерах температура ППС заметно ниже и изменяется в зависимости от коэффициента экстинкции только на ~2°C. Это также отражено на рис. 2б, где приведена зависимость температуры ППС от глубины озер при их разной прозрачности. Зависимость температуры ППС от длины разгона ветра для исследованных малых озер не выявлена.

Толщина ППС. Толщина ППС в малых озерах в основном зависит от ветрового воздействия, степени стратификации и прозрачности воды. При уменьшении коэффициента экстинкции от 1.9 до 0.3 м^{-1} глубина ППС увеличивается почти на 5 м (рис. 3а). В метатермических водоемах глубина ППС на 1.0–1.5 м больше, чем в гипотермических озерах. В “цветных” метатермических озерах (коэффициент экстинкции 1.9 м^{-1}) эта глубина составляет ~3 м и под термоклин проникает всего 0.2–0.5% солнечной энергии (рис. 3б). При уменьшении толщины эпилимниона до 2 м в глубоком “цветном” озере под термоклин проникает до 4% света. В самых чистых прозрачных озерах глубина 1%-ной облученности расположена на 9–15 м, что почти в два раза больше глубины ППС (рис. 3а).

Под термоклин в этих озерах проникает до 6–13% солнечной энергии, что приводит к нагреванию воды и ослаблению температурных градиентов в стратифицированном слое. При одинаковом количестве солнечной энергии, приходящем на водную поверхность разных по прозрачности озер, в “цветных” озерах прогревается лишь от-

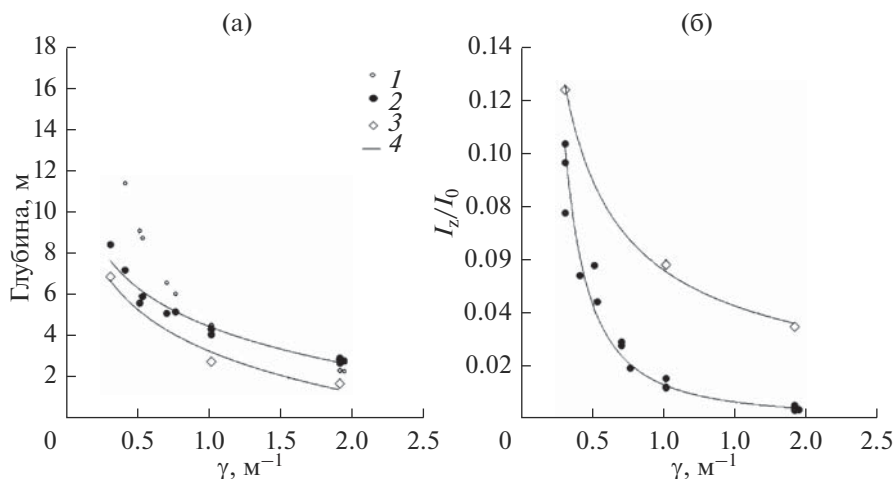


Рис. 3. а — зависимость глубины ППС от коэффициента экстинкции (γ) в разнотипных озерах южной Карелии: 1 — глубина 1%-й облученности, 2 — метатермические озера, 3 — гипотермические озера, 4 — нелинейная аппроксимация данных. б — доля солнечной энергии проникающей под термоклин (I_z) от величины на поверхности воды (I_0) в разнотипных озерах.

Fig. 3. а — dependence of the depth of the surface mixed layer on the extinction coefficient in different types of lakes in southern Karelia: 1 — depth of 1% irradiation, 2 — metathermal lakes, 3 — hypothermic lakes, 4 — nonlinear data approximation. б — the percentage of solar energy penetrating under the thermocline (I_z) of the value on the water surface (I_0) in lakes of different types.

носительно тонкий поверхностный слой воды, в результате чего создаются большие градиенты температуры и плотности воды, препятствующие вертикальному перемешиванию. В прозрачных озерах такое же количество тепла перераспределяется на большую глубину. Градиенты в них значительно меньше, и озеро легче поддается перемешиванию под воздействием ветра и ночного выхолаживания с заглублением термоклина.

Во многих исследованиях отмечается, что глубины ППС и термоклина в озерах зависят от длины разгона ветра [9, 20, 28]. Расчеты на модели “Flake” показали, что зависимость глубины ППС от длины разгона ветра для исследованных малых озер с площадью от 0.01 до 5 км² незначительна. Увеличение глубины ППС для данного диапазона изменений площади озер при различной длине разгона ветра не превышает 0.2–0.5 м. Это может свидетельствовать о том, что доминирующие механизмы перемешивания отличаются в озерах с площадью меньше 5 км² и в озерах с большей площадью, в которых решающую роль в перемешивании играет ветровое воздействие. Предположительно, в малых озерах при уменьшении интенсивности ветро-волнового перемешивания возрастает относительная роль эффектов конвективного перемешивания в результате ночного охлаждения вследствие длинноволнового излучения.

Термический режим озер в разные по погодным условиям годы. Чтобы рассмотреть реакцию термического режима разнотипных озер на климатическую изменчивость, из 14-летнего периода наблюдений (1999–2012 г.) были выбраны годы с преобладанием относительно прохладных (2007 г.) и исключительно теплых (2010 г.) синоптических условий в весенне-летний сезон. Следует отметить, что летний период (июнь–первая половина августа) 2010 г. был самым жарким за последние 60 лет на территории Карелии. По наблюдениям на метеостанциях Петрозаводск и Медвежьегорск в период с 15 июня по 20 июля средняя температура воздуха в 2010 г. по сравнению с 2007 г. была

выше на 3.7–4.2°C, при снижении общей облачности на 30–40% и уменьшении средней скорости ветра на 5–15%. По измерениям в разнотипных озерах Карелии средние месячные значения температуры воздуха и воды в июне и июле связаны между собой с коэффициентами корреляции 0.7–0.9 и регрессионными коэффициентами от 0.6 до 1.0 [1]. Наиболее высокие значения коэффициентов соответствуют малым озерам.

Модельные расчеты для 30 вариантов различных сочетаний прозрачности и глубины озер были разделены на три группы в зависимости от значений коэффициента экстинкции (1.85–1.93, 0.75–1.0 и 0.3–0.4 м⁻¹), а внутри каждой группы отсортированы по возрастанию глубины (от 2.5 до 19 м). На рис. 4 приведены разницы температуры (рис. 4а), глубины (рис. 4б) и теплозапаса ППС (рис. 4в) в озерах во второй декаде июля в прохладный 2007 г. и жаркий 2010 г.

Результаты расчетов показали, что наибольших значений температура ППС достигала в мелких “цветных” озерах, а глубина и теплозапас перемешанного слоя — в прозрачных глубоких озерах.

В жаркий 2010 г. в эпи- и метатермических озерах (глубина ≤10 м) с коэффициентами экстинкции от 0.75 до 1.93 м⁻¹ температура воды была выше на 3–4°C, чем в прохладный 2007 г. В прозрачных (коэффициенты экстинкции ~0.3–0.4 м⁻¹) эпи- и метатермических озерах увеличение температуры воды в жаркий год было в среднем на 1°C меньше. Максимальный прирост температуры ППС (+4.7 + 5.0°C) получен в 2010 г. для мелких (глубины 2.6, 4.2 м) прозрачных озер. При повышении температуры в жаркий год и усилении плотностной стратификации глубина ППС уменьшается наиболее заметно в глубоких прозрачных озерах. Жарким летом 2010 г. теплозапас ППС в мелких и средних по глубине “цветных” и прозрачных озерах увеличился, а в глубоких озерах уменьшился.

Климатические изменения оказывают влияние не только на само озеро, но и на его водосбор. При потеплении климата увеличивается испарение с водосбора [5], что может приводить к существенным изменениям стока [2] и выноса растворенного органического вещества с заболоченных территорий. Водная толща малых прозрачных озер летом прогревается лучше, чем водная толща “цветных” озер с низкой прозрачностью воды (см. рис. 4). При уменьшении цветности воды в прозрачных озерах на 5 градусов платиново-кобальтовой шкалы коэффициент экстинкции уменьшится от 0.5 до 0.3 м⁻¹, а глубина перемешанного слоя и его теплозапас увеличатся на ~2 м и ~15–20% соответственно. Такого эффекта не дает даже изменение цветности воды на 20–30 градусов и коэффициента экстинкции на 0.5–0.7 м⁻¹ в “цветных” озерах. Это позволяет предположить, что небольшие по площади прозрачные водоемы с большой глубиной являются наиболее чувствительными к климатическим изменениям.

Полученные нами результаты хорошо согласуются с данными недавно опубликованного масштабного исследования — моделирования поверхностной температуры и стратификации в 2368 озерах штата Висконсин (США) за период 1979–2011 г. [29]. Авторы показали, что связь между характеристиками разных озер была сильной для температуры поверхности и слабой для сроков установления стратификации, что было проявлением различной реакции разнотипных озер на изменчивость регионального климата. Авторы подчеркивают, что данные по озерам с большим количеством наблюдений могут не отражать динамику стратификации для “ненаблюдаемых” озер, подверженных воздействию того же регионального климата. При этом сходная реакция температуры поверхности озер может дать лимнологам ложную уверенность в понимании реакции экосистем озера на изменяющийся климат. Поэтому наиболее экологически значимыми показателями реакции озер на внешнее воздействие авторы считают не температуру поверхности, а наличие/отсутствие стратификации или температуру всего озера, которые отражают широкий спектр откликов озер на изменчивость климата.

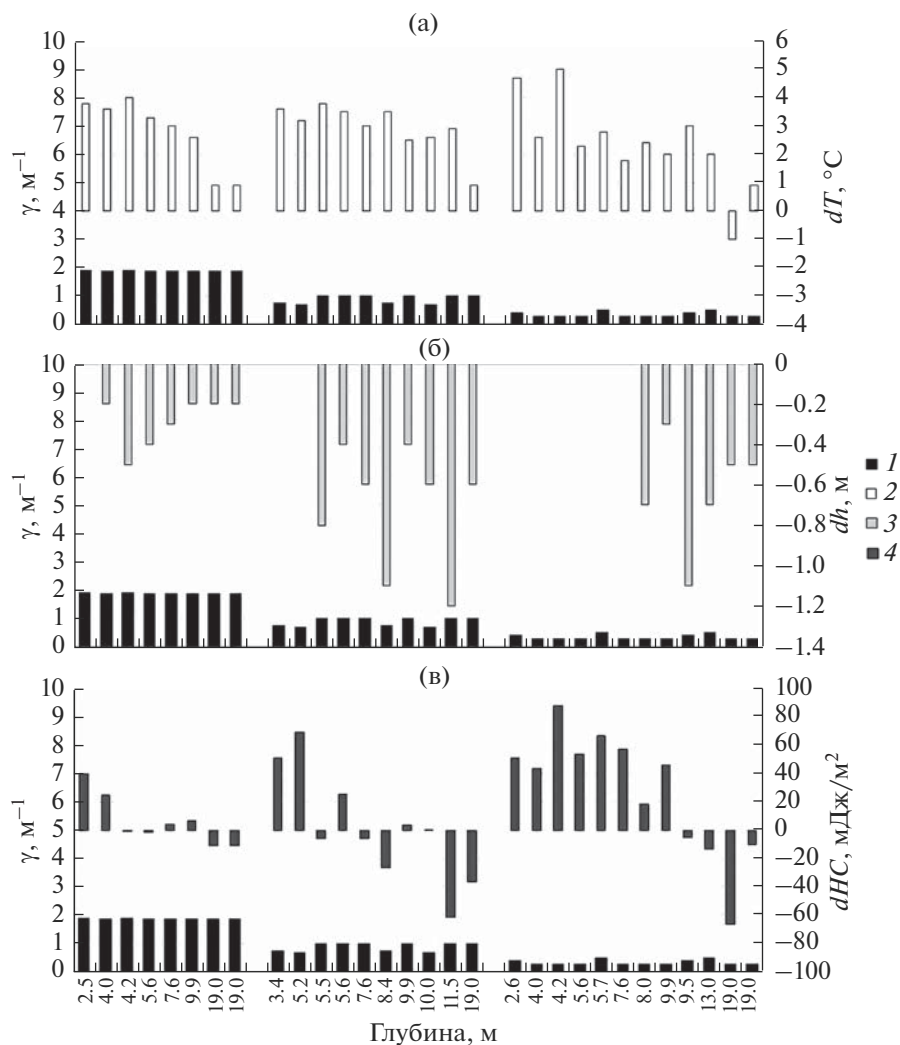


Рис. 4. Разница температуры (а) и глубины ППС (б), а также его теплозапаса (в) в разнотипных озерах во вторую декаду июля в годы, заметно отличающиеся по погодным условиям: прохладный 2007 г. и жаркий 2010 г. По горизонтальной оси приведены глубины озера. 1 – коэффициент экстинкции γ , 2 – температура ППС, 3 – глубина ППС, 4 – теплозапас ППС.

Fig. 4. Difference in temperature (a) and depth of surface mixed layer (б) and its heat content (в) in different types of lakes in the second decade of July in years that differ significantly in weather conditions: cool 2007 and hot 2010. The depths of the lakes are shown along the horizontal axis. 1 – extinction coefficient γ , 2 – temperature, 3 – depth, 4 – heat storage of surface mixed layer.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ модельных расчетов термического режима разнотипных малых озер южной Карелии (с площадью менее 5 км^2) для периода 1999–2012 гг. с применением одномерной модели FLake. Исследовано две группы озер, расположенных на одной географической широте, но в разных ландшафтах таежной зоны. Озера Вендюр-

ской группы и Заонежья демонстрируют разную реакцию термического режима на сходные погодные условия разных лет. Выявленные различия термического режима рассмотренных двух групп озер обусловлены морфометрическими особенностями их котловин. Неглубокие озера Вендюрской группы летом хорошо прогреваются и неоднократно перемешиваются до дна. Более глубокие озера Заонежской группы относятся к метатермическим и гипотермическим (Кондозеро). Анализ результатов серии расчетов температуры, толщины и теплозапаса поверхностного перемешанного слоя (ППС) выбранных озер показал, что температура и глубина ППС в них определяются также прозрачностью воды, которая формируется под влиянием лесистости и заболоченности водосборной территории, т.е. ландшафтных особенностей.

Предположительно доминирующие механизмы перемешивания в озерах с площадью менее 5 км² отличаются от процессов перемешивания в озерах, больших по площади, в которых глубина эпилимниона зависит, главным образом, от ветрового воздействия. В малых озерах при уменьшении интенсивности ветро-волнового перемешивания может возрастать относительная роль эффектов конвективного перемешивания в результате ночного охлаждения и длинноволнового излучения.

Выявлена заметная межгодовая изменчивость термического режима малых озер. Показано, что реакция озер на атмосферное воздействие заметно отличается в жаркие и прохладные годы. При повышении температуры в жаркий год и усилении плотностной стратификации глубина ППС уменьшается наиболее заметно в глубоких прозрачных озерах, при этом теплозапас ППС в эпи- и метатермических “цветных” и прозрачных озерах увеличивается, а в гипотермических — уменьшается.

Климатические изменения оказывают влияние не только на термический режим озер, но и на элементы водного баланса их водосбора. При наблюдаемой изменчивости регионального климата Карелии может увеличиться испарение с водосбора озер, что может привести к существенным изменениям стока и выноса растворенного органического вещества с заболоченных территорий. Анализ термического режима озер при уменьшении прозрачности показал, что в течение жарких лет наиболее выраженное увеличение глубины ППС и его теплозапаса наблюдается в глубоких прозрачных водоемах, которые, предположительно, наиболее чувствительны к климатическим изменениям.

Неоднородность реакции термической структуры разнотипных озер на изменение внешних воздействий важна для понимания того, как экосистемы озер реагируют на изменение климата, а также для выявления типов озер, наиболее уязвимых к изменяющемуся климатическому воздействию. Очевидна необходимость продолжения исследований реакции термического режима разнотипных озер на происходящие изменения регионального климата.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера — обособленного подразделения ФГБУН ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 228–238.
2. Карпечко Ю.В. Изменение годового стока с речных водосборов // Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 55–63.
3. Кузьменко Л.Г. Термический режим водной массы и донных отложений // Биологическая продуктивность озера Красного. Л., Наука, 1976. С. 18–36.
4. Лаборатория Имитационного Моделирования. Моделирование солнечной радиации. URL: <http://energovent.com/ru/stati/modelirovanie-solnechnoj-radiatsii> (дата обращения 16.09.2020 г.)
5. Назарова Л.Е. Влияние колебаний климата на сток с водосбора Онежского озера // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 171–174.
6. Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

7. Океанографические таблицы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
8. Пальшин Н.И., Ефремова Т.В., Здорвеннова Г.Э., Здорвеннов Р.Э. Показатель ослабления облученности в озерах Карелии // Изв. РГО. 2018. Т. 150. Вып. 6. С. 58–72.
<https://doi.org/10.7868/S08696071180600512018>
9. Пальшин Н.И., Ефремова Т.В., Потахин М.С. Влияние морфометрических характеристик и географической зональности на термическую стратификацию озер // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 202–209.
10. Погода России. URL: <http://meteo.infospace.ru/> (дата обращения 16.09.2020 г.)
11. Потахин М.С. Новые данные по морфологии озер Заонежского полуострова // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 3. С. 91–98.
12. Хомскис В. Динамика и термика малых озер. Вильнюс: Минтис, 1969. 204 с.
13. Brönmark C., Hansson L.A. The Biology of Lakes and Ponds. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 285.
14. Christianson K.R., Johnson B.M., Hooten M.B., Roberts J.J. Estimating lake-climate responses from sparse data: An application to high elevation lakes // Limnol. Oceanogr. 2019. V. 64. P. 1371–1385.
15. Del Sontro T., Beaulieu J.J., Downing J.A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change // Limnol. Oceanogr.: Letters. 2018. V. 3(3). P. 64–75.
<https://doi.org/10.1002/lol2.10073>
16. Fee E.J., Hecky R.E., Kasian S.E.M., Cruikshank D.R. Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian shield lakes // Limnol. Oceanogr. 1996. V. 41(5). P. 912–920.
17. Flake Online – Lake model Flake. URL: <http://www.flake.igb-berlin.de/> (дата обращения 16.09.2020 г.)
18. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental modelling & Software. 2010. 25. P. 793–801.
19. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A. 2012. V. 64. P. 17264.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17264>
20. Gorham E., Boyce F.M. Influence of lake surface area and depth upon thermal stratification and the depth of the summer thermocline // J. Great Lakes Research. 1989. V. 15(2). P. 233–245.
<http://purl.umn.edu/148413>
21. Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M. et al. Methane Emission From the Surface of the Mozhaik Valley-Type Reservoir. // Geogr. Nat. Resour. 2019. V. 40. P. 247–255.
<https://doi.org/10.1134/S1875372819030077>
22. IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change. Reports. URL: <https://www.ipcc.ch/reports/> (дата обращения 16.09.2020 г.)
23. Jöhnk K.D. 1D hydrodynamic models in limnophysics (Turbulence – Meromixis Oxygen) // Habilitationsschrift. Limnophysics Rep. 2001. V. 1(1). P. 1–235.
24. Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // Bor. Environ. Res. 2010. V. 15. P. 279–293.
25. Mazumder A., Taylor W.D. Thermal structure of lakes varying in size and water clarity // Limnol. Oceanogr. 1994. V. 39(4). P. 968–976.
26. Mironov D.V., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterization scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal Env. Res. 2010. V. 15. P. 218–230.
27. O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. I. 24. P. 10773–10781.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
28. Patalas K. Mid-summer mixing depths of lakes of different latitudes // Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. 1984. V. 22. P. 97–102.
29. Read J.S., Winslow L.A., Hansen G.J.A., Van Den Hoek J., Hanson P.C., Bruce L., Markfort C.D. Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology // Ecological Modelling. 2014. V. 291. P. 142–150.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.029>
30. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 5. P. 1977–2006.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016>
31. Subin Z.M., Riley W.J., Mironov D. An improved lake model for climate simulations: model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1 // J. Adv. Model Earth Syst. 2012. V. 4. P. M02001.
<https://doi.org/10.1029/2011MS000072>
32. Tranvik L.J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54(6). P. 2298–2314.
https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298

33. Zdorovenova G., Palshin N., Zdorovenov R., Golosov G., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography. Environment. Sustainability*. 2016. № 2. V. 9. P. 47–57.
https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_04

Thermal Regime of Small Lakes in Karelia (Calculations on the Numerical FLake Model)

N. I. Palshin^{1, *}, T. V. Efremova^{1, **}, G. E. Zdorovenova^{1, ***}, G. G. Gavrilenko^{1, ****},
 R. E. Zdorovenov^{1, *****}, A. Yu. Terzhevik^{1, *****}, and S. R. Bogdanov^{1, *****}

¹*Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

*e-mail: npalshin@mail.ru

**e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

***e-mail: zdorovenova@gmail.com

****e-mail: gg.gavrylenko@gmail.com

*****e-mail: romga@gmail.com

*****e-mail: ark1948@list.ru

*****e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Based on the results of simulations using the numerical model FLake, the variability of the thermal regime of small lakes (with an area of less than 5 km²) of different types in Karelia under different weather conditions (1999–2012) was studied. The response of temperature, thickness and heat content of the surface mixed layer of lakes during the period of maximum heating of their water column (the second decade of July) to the weather conditions of cold 2007 and anomalously hot 2010 years is considered. In a hot year, the increase in the temperature of the surface layer in the “colored” lakes is noticeably higher than in the transparent ones. At the same time, the depth of the mixed layer decreases most noticeably in deep transparent lakes. The heat storage of the surface layer in epi- and metathermal “colored” and transparent lakes increases, and in hypothermic lakes it decreases. Calculations have shown that with increasing transparency, the most pronounced increase in the depth of the surface layer and its heat storage is observed in deep transparent water bodies, as compared with “colored” epi- and metathermal ones. With possible climatic changes in evaporation and input of dissolved substances into lakes from catchments, one can expect the most expressed changes in the thermal regime of deep transparent lakes.

Keywords: small lake, thermal regime, water temperature, extinction coefficient, FLake model, upper mixed layer

REFERENCES

1. Efremova T.V., Pal'shin N.I., Belashev B.Z. Temperatura vody raznotipnyh ozer Karelii v usloviyah izmeneniya klimata (po dannym instrumental'nyh izmerenij 1953–2011 gg.) // *Vodnye resursy*. 2016. V. 43. № 2. S. 228–238.
2. Karpechko Yu.V. Izmenenie godovogo stoka s rechnykh vodosborov // *Klimat Karelii: Izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob'ekty*. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2004. S. 55–63.
3. Kuz'menko L.G. Termicheskij rezhim vodnoj massy i donnyh otlozhenij // *Biologicheskaya produktivnost' oz. Krasnogo*. L., Nauka, 1976. S. 18–36.
4. Laboratoriya Imitacionnogo Modelirovaniya. Modelirovanie solnechnoj radiacii. URL: <http://energyvent.com/ru/stati/modelirovanie-solnechnoj-radiatsii> (data obrashcheniya 16.09.2020 g.)
5. Nazarova L.E. Vliyanie kolebanij klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2010. № 1. S. 171–174.
6. Oзера Karelii. Spravochnik. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2013. 464 s.
7. Okeanograficheskie tablicy. L.: Gidrometeoizdat, 1975.
8. Pal'shin N.I., Efremova T.V., Zdorovenova G.E., Zdorovenov R.E. Pokazatel' oslableniya obluchennosti v ozerah Karelii // *Izv. RGO*. 2018. V. 150. Vyp. 6. S. 58–72. DOI 10.7868/S08696071180600512018
9. Pal'shin N.I., Efremova T.V., Potahin M.S. Vliyanie morfometricheskikh harakteristik i geograficheskoy zonal'nosti na termicheskuyu stratifikaciju ozer // *Vodnye resursy*. 2008. V. 35. № 2. S. 202–209.

10. Pogoda Rossii. URL: <http://meteo.infospace.ru/> (data obrashcheniya 16.09.2020 g.)
11. Potahin M.S. Novye dannye po morfologii ozer Zaonezhskogo poluostrova // Obshchestvo. Sreda. Razvitie. 2017. № 3. S. 91–98.
12. Homskis V. Dinamika i termika malyh ozer. Vil'nyus: Mintis, 1969. 204 s.
13. Brönmark C., Hansson L.A. The Biology of Lakes and Ponds. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 285.
14. Christianson K.R., Johnson B.M., Hooten M.B., Roberts J.J. Estimating lake-climate responses from sparse data: An application to high elevation lakes // Limnol. Oceanogr. 2019. V. 64. P. 1371–1385.
15. Del Sontro T., Beaulieu J.J., Downing J.A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change // Limnol. Oceanogr.: Letters. 2018. V. 3(3). P. 64–75. doi 10.1002/lol2.10073
16. Fee E.J., Hecky R.E., Kasian S.E.M., Cruikshank D.R. Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian shield lakes // Limnol. Oceanogr. 1996. V. 41(5). P. 912–920.
17. Flake Online — Lake model Flake URL: <http://www.flake.igb-berlin.de/> (data obrashcheniya 16.09.2020 g.)
18. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental modelling & Software. 2010. V. 25. P. 793–801.
19. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A. 2012. V. 64. P. 17264. DOI 10.3402/tellusa.v64i0.17264
20. Gorham E., Boyce F.M. Influence of lake surface area and depth upon thermal stratification and the depth of the summer thermocline // J. Great Lakes Research. 1989. V. 15(2). P. 233–245. <http://purl.umn.edu/148413>
21. Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M. et al. Methane Emission From the Surface of the Mozhaik Valley-Type Reservoir. // Geogr. Nat. Resour. 2019. V. 40. P. 247–255. <https://doi.org/10.1134/S1875372819030077>
22. IPCC — The Intergovernmental Panel on Climate Change. Reports. URL: <https://www.ipcc.ch/reports/> (data obrashcheniya 16.09.2020 g.)
23. Jöhnk K.D. 1D hydrodynamic models in limnophysics (Turbulence — Meromixis Oxygen) // Habilitationsschrift. Limnophysics Rep. 2001. V. 1(1). P. 1–235.
24. Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // Bor. Environ. Res. 2010. V. 15. P. 279–293.
25. Mazumder A., Taylor W.D. Thermal structure of lakes varying in size and water clarity // Limnol. Oceanogr. 1994. V. 39(4). P. 968–976.
26. Mironov D.V., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterization scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal Env. Res. 2010. V. 15. P. 218–230.
27. O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. I. 24. P. 10773–10781. DOI 10.1002/2015GL066235
28. Patalas K. Mid-summer mixing depths of lakes of different latitudes // Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. 1984. V. 22. P. 97–102.
29. Read J.S., Winslow L.A., Hansen G.J.A., Van Den Hoek J., Hanson P.C., Bruce L., Markfort C.D. Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology // Ecological Modelling. 2014. V. 291. P. 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.029>
30. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 5. P. 1977–2006. DOI 10.5194/gmd-9-1977-2016
31. Subin Z.M., Riley W.J., Mironov D. An improved lake model for climate simulations: model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1 // J. Adv. Model Earth Syst. 2012. V. 4. P. M02001. DOI 10.1029/2011MS000072
32. Tranvik L.J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54(6). P. 2298–2314. DOI 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298
33. Zdorovenнова G., Palshin N., Zdorovenнов R., Golosov G., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A. The oxygen regime of a shallow lake // Geography. Environment. Sustainability. 2016. № 2. V. 9. P. 47–57. DOI 10.15356/2071-9388_02v09_2016_04

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ЛЕСА В АРИДНЫХ ВЫСОКОГОРЬЯХ ЗАПАДНОЙ ТУВЫ

© 2020 г. М. А. Колунчукова^{а, *}, А. И. Резников^{б, **}

^аСПГХЛ им. Иогансона при РАН, Санкт-Петербург, Россия

^бСанкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: kolun4ukova@yandex.ru

**E-mail: ar1725-2@mail.ru

Поступила в редакцию 15.08.2020 г.

После доработки 25.08.2020 г.

Принята к публикации 01.09.2020 г.

В статье представлены результаты оценки степени влияния основных климатических факторов на прирост деревьев и анализа современной динамики верхней границы леса в горах Западной Тувы. Проведен дендрохронологический анализ древесных образцов лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) с ключевых участков, расположенных на верхней границе леса. Для каждого из участков были построены обобщенные дендрохронологические ряды. В результате исследований также проведен анализ многолетней динамики летней температуры воздуха и суммы летних осадков. Проведен сравнительный анализ хронологий, оценены связи с температурой и осадками исследуемого района. Выявлено, что при существующем тренде повышения температуры, динамика прироста деревьев на верхней границе леса отражает эти изменения по-разному. При условии достаточного увлажнения наблюдается положительная связь со средними температурами лета и отрицательная с осадками.

Ключевые слова: верхняя граница леса, динамика прироста, дендрохронологический анализ, высокогорья Западной Тувы, летняя температура воздуха

DOI: 10.31857/S0869607120030039

ВВЕДЕНИЕ

Оценка влияния климатических факторов на динамику прироста деревьев и решение обратной задачи индикации изменений климата стали распространенной темой географических исследований. Деревья, произрастающие на верхнем пределе своего распространения в горах, наиболее чувствительны к изменению тех климатических параметров, которые ограничивают их рост [6, 7]. Это дает уникальную возможность для определения и анализа вклада климатических факторов в изменчивость прироста. Согласно данным метеонаблюдений во внетропических горах Евразии на протяжении XX в. отмечается тенденция к повышению температуры воздуха, что находит отражение в изменениях элементов высотной поясности ландшафтов, в частности верхней границы леса [4, 12]. В пределах Алтае-Саянского региона исследователи неоднократно отмечали подъем верхней границы леса в последние десятилетия, подчеркивая связь ее положения с летней температурой воздуха [8, 9, 12, 14]. Со времен М.В. Тронова считается, что атмосферные осадки, напротив, не лимитируют верхний предел

леса: "...граница леса, расположена ли она выше или ниже, как и вообще наличие леса на горном склоне, не указывает определенным образом на степень его увлажненности. Можно только говорить о некотором достаточном количестве годовых осадков, но это может быть и 500 и 1000 мм" [14, с. 33]. Степень увлажнения в большей степени определяет положение нижней границы леса. В случае с верхним пределом произрастания леса, избыточное увлажнение может отрицательно сказываться на росте деревьев, так как не редки случаи отрицательной корреляции между летними температурами воздуха и суммами атмосферных осадков. В данной работе была предпринята попытка оценить степень влияния основных климатических факторов на прирост деревьев и проанализировать современную динамику верхней границы леса в горах Западной Тувы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования состояния древесной растительности в Западной Туве и Монголии были начаты географами Санкт-Петербургского государственного университета как один из способов изучения динамики горных ландшафтов с 1990 г. Данная публикация основана на материалах, полученных в экспедициях в горах Западной Тувы (Монгун-Тайгинский, Улуг-Хемский кожууны) в период 2012–2013 гг. В ходе полевых работ были проведены исследования современного состояния древесной растительности на верхнем пределе ее произрастания, а также был собран материал для дендрохронологического анализа. Всего было проанализировано 120 образцов, продолжительностью от 20 до 182 лет. В пределах трех ключевых участков (рис. 1) на 7 пробных площадях на верхней границе леса, состоящей в основном из лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), редко с примесью кедра сибирского (*Pinus sibirica*), выделялись и фиксировались следующие высотные отметки: верхняя граница произрастания отдельных деревьев, верхняя граница распространения островных редколесий, верхняя граница распространения сплошных лесов [6].

I участок сбора дендрохронологического материала (рис. 2) расположен на северо-западе Тувы, на Алашанском нагорье, являющимся частью горной системы Западного Саяна, в долине реки Сайдалыг, притока р. Кара-Суг (индекс образцов КС).

Древесная растительность высокогорного пояса представлена разреженным лиственничником, формирующим верхнюю границу леса на высоте 2210–2250 м. Наряду с лиственницей встречается кедр сибирский, в основном в виде подроста. Возраст деревьев не превышает 65 лет и в среднем составляет 40 лет.

II участок исследований (рис. 3) расположен на южном макросклоне хребта Западный Танну-Ола, в долинах рек Арзайты и Эльдиг-Хем (индекс образцов ЭХ).

Леса образуют здесь целостную полосу в структуре высотной поясности, древесная растительность растет по водоразделам. Верхняя граница сплошного леса достигает уровня 2200–2400 м, редколесья – 2450 м, отдельные деревья поднимаются до высоты 2585 м. Древесная растительность представлена лиственницей сибирской, в качестве примеси встречается кедр. Средний возраст деревьев составляет 35 лет, подрост произрастает по всему профилю.

III участок (рис. 4) – долина реки Мугур в пределах высокогорного массива Монгун-Тайга (МТ). Леса представлены лиственничниками и не образуют здесь сплошного пояса. Они встречаются островными участками в диапазоне высот 2000–2400 м (отдельные деревья поднимаются до 2550 м) и приурочены к ложбинам и понижениям на склонах северной экспозиции [13]. Ясно выражена граница сомкнутого леса, выше которого встречаются одиночные деревья (в том числе в стланиковой форме), а редколесье как таковое отсутствует. Средний возраст деревьев на верхней границе сомкнутого леса составляет 100 лет (без учета подроста), возраст большинства одиночных де-

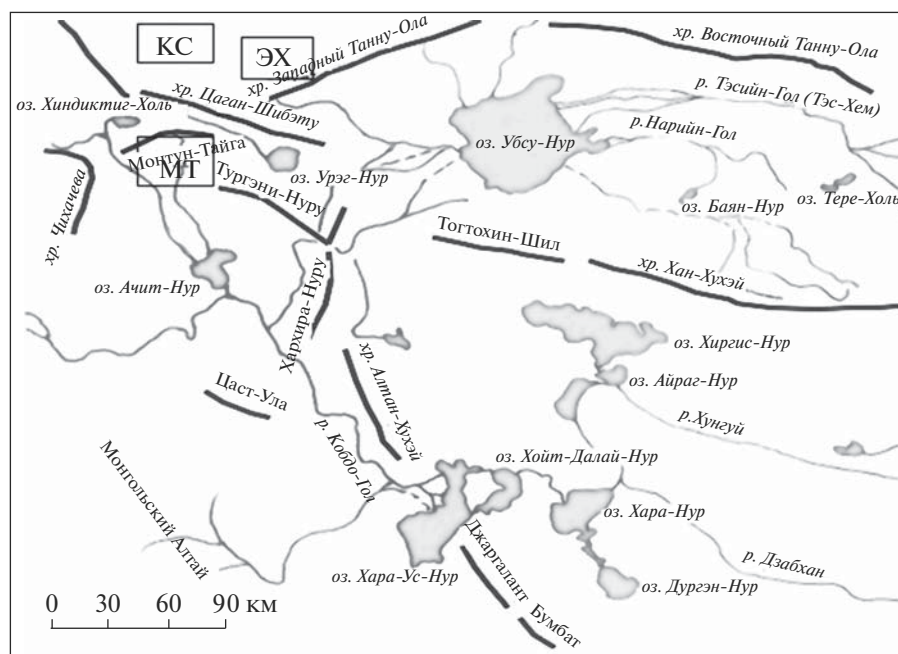


Рис. 1. Карта-схема района исследования. КС, МТ, ЭХ – пробные площади.

Fig. 1. Schematic map of the study area. КС, МТ, ЭХ – sample plots.



Рис. 2. Участок I (Кара-Суг, индекс образцов КС).

Fig. 2. Area I (Kara-Sug, index of the samples КС).



Рис. 3. Участок II (Эльдиг-Хем, индекс образцов ЭХ).

Fig. 3. Area II (Eldig-Hem, index of the samples ЭХ).

ревьев — около 55 лет, однако встречаются также лиственницы возрастом более 150 лет. Подрост наблюдается в основном в пределах распространения сомкнутого леса.

Образцы для дендрохронологического анализа брались шведским возрастным буром. Измерение ширины годовичных колец с точностью до 0.01 мм выполнялось с помощью измерительного комплекса LINTAB с пакетом программ Tsap, дополнительный контроль датировки проводился с помощью программы COFECHA [15, 16]. Корреляционный анализ производился с использованием программы Statistica 8.

По общепринятой методике современного дендрохронологического анализа индивидуальные древесно-кольцевые хронологии стандартизируют, то есть приводят к относительным величинам, тем самым исключая возрастной (и всякий другой) тренд [8, 9, 12, 14 и др.] (рис. 5).

Таким образом, получают индексы прироста и обобщенные ряды, в которых исключены длительновременные индивидуальные особенности радиального роста деревьев и сохранена только относительная изменчивость прироста. Безусловно, этот метод имеет свои сильные стороны и успешно применяется при реконструкциях климатических параметров, особенно при анализе структуры временных ритмов.

Однако, так как в данной работе стоит задача выявления общих тенденций изменения прироста деревьев в зависимости от климатических показателей, необходимо использовать выраженные временные тренды. Поэтому для статистического анализа



Рис. 4. Участок III (Монгун-Тайга, индекс образцов МТ).

Fig. 4. Area III (Mongun-Taiga, index of the samples MT).

были использованы абсолютные значения радиальных приростов без стандартизации и нормирования.

Ранее было отмечено, что на верхнем пределе произрастания деревьев зависимость радиального прироста от возраста слабо выражена, так как рост в первую очередь лимитируется внешними факторами [14]. Поэтому для исключения влияния возрастной изменчивости прироста достаточно просто исключить из рассмотрения начальный его этап, на котором в основном и проявляются физиологически обусловленные повышенные значения прироста (рис. 6).

Такой прием позволяет также исключить ошибки измерения ширины годичных колец на приборе Lintab для тех образцов, при взятии которых бур прошел мимо центрального кольца [3, 5]. Также у долгоживущих лиственниц в районе исследований часто древесина в центре ствола повреждена и не может быть использована в целях дендроиндикации. Практика показывает, что такие образцы составляют значительную часть от общего количества. Таким образом, в данной работе вполне допустимо использовать осредненные абсолютные серии ширины колец, которые, по нашему мнению, наиболее полно характеризуют изменение интегрального состояния геосистем по критерию прироста фитомассы.

Полученные индивидуальные древесно-кольцевые хронологии показали высокую согласованность внутри каждого участка (парные коэффициенты корреляции составили 0.6–0.7). Поэтому по каждому из трех обследованных участков на верхней границе леса путем вычисления среднего арифметического абсолютных значений прироста (без начальных значений ряда для каждого образца) были построены обобщенные дендрохронологические ряды. Для выявления зависимости между приростом деревьев и климатическими параметрами использовались месячные данные высокогорных метеорологических станций, наиболее близко расположенных к районам исследований: Мугур-Аксы (50°23' N, 90°26' E, 1837 м над ур. моря, использованный период наблю-

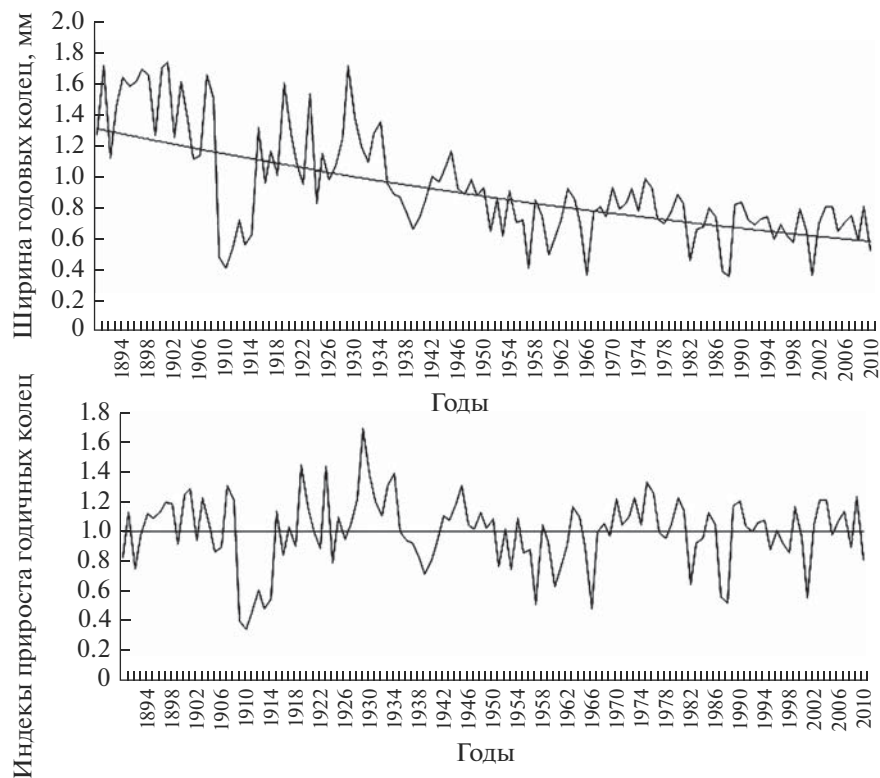


Рис. 5. Традиционный метод обработки дендрохронологических рядов: изменчивость ширины годичных колец в абсолютных значениях и индексы прироста.

Fig. 5. Traditional method of dendrochronological data processing: tree-rings width variability in absolute terms and index of tree growth.

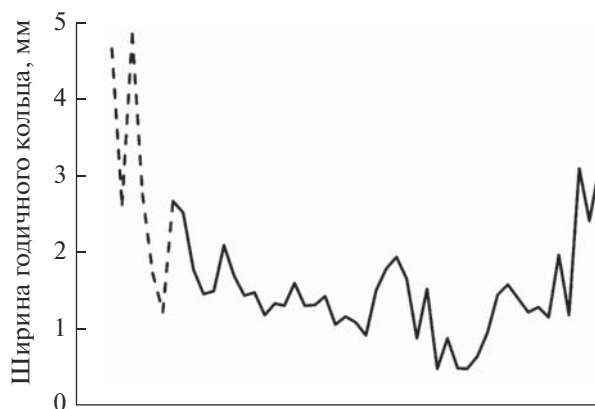


Рис. 6. Метод исключения влияния возрастной изменчивости прироста путем “отсечения” начального участка (показан пунктиром).

Fig. 6. The method of excluding the influence of age-related tree-rings growth by cutting off the initial segment (shown by dotted line).

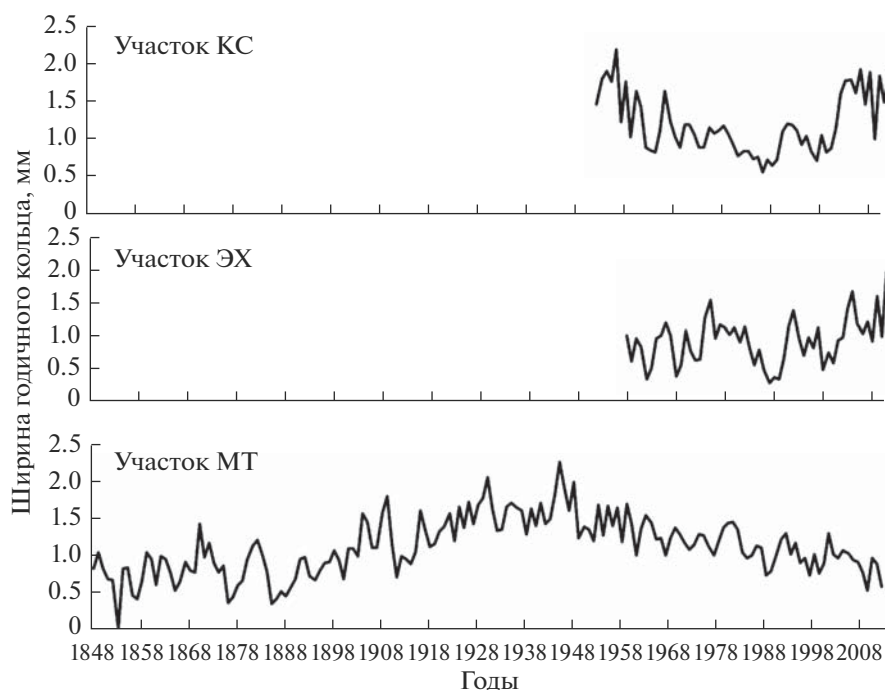


Рис. 7. Изменчивость значений ширины годичных колец древесно-кольцевых хронологий для трех участков.

Fig. 7. Annual tree-rings width variability of tree-ring chronology for three study areas.

дения 1963–2012 гг.), Тээли ($51^{\circ}01' \text{ N}$, $90^{\circ}13' \text{ E}$, 982 м над ур. моря, использованный период наблюдения 1961–2012 гг.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для трех выше описанных участков были получены три древесно-кольцевых хронологии по ширине годичных колец (рис. 7).

Наиболее длительные хронологии (180 лет) построены для участка МТ, для остальных участков длина рядов не превышает 60 лет. Для оценки влияния термических условий на прирост годичных колец использовались ряды средних летних температур воздуха [2, 3].

Во временных изменениях ширины годичных колец хронологий КС и ЭХ прослеживается общий выраженный тренд и тенденция увеличения значений прироста с 1985 г., что соответствует хоть и не ярко выраженному, но все же увеличению средних летних температур на рассматриваемых метеостанциях в это же время (рис. 8).

У хронологий КС и ЭХ наблюдаются общие положительные связи летних температур и изменчивости прироста, отрицательные — с осадками (рис. 9).

Таким образом, на участках КС и ЭХ увеличение прироста в основном определяется средними летними температурами. Общий тренд на увеличение радиального прироста с конца 80-х гг. XX в. хорошо согласуется с тем, что большинство метеостанций во Внутренней Азии также показывают положительный тренд средних летних температур [4, 12]. Периоды увеличения прироста совпадают со временем появления нового поколения деревьев. Также на участках КС и ЭХ можно говорить о подъеме верхней гра-

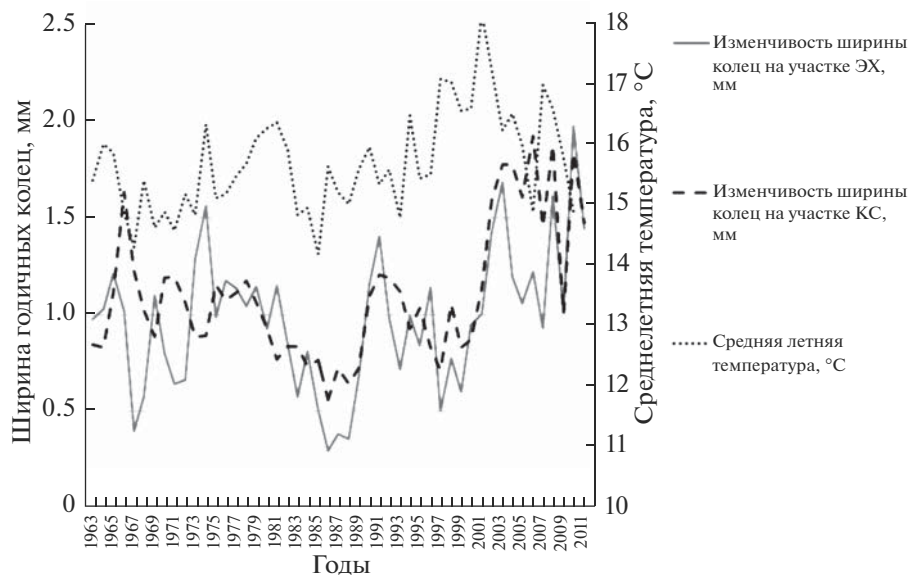


Рис. 8. Изменчивость ширины годичных колец на участках ЭХ, КС и ход средней летней температуры на метеостанции Тээли.

Fig. 8. Annual tree-rings width variability for the study areas ЭХ, КС and average summer temperature at the Teeli meteorological station.

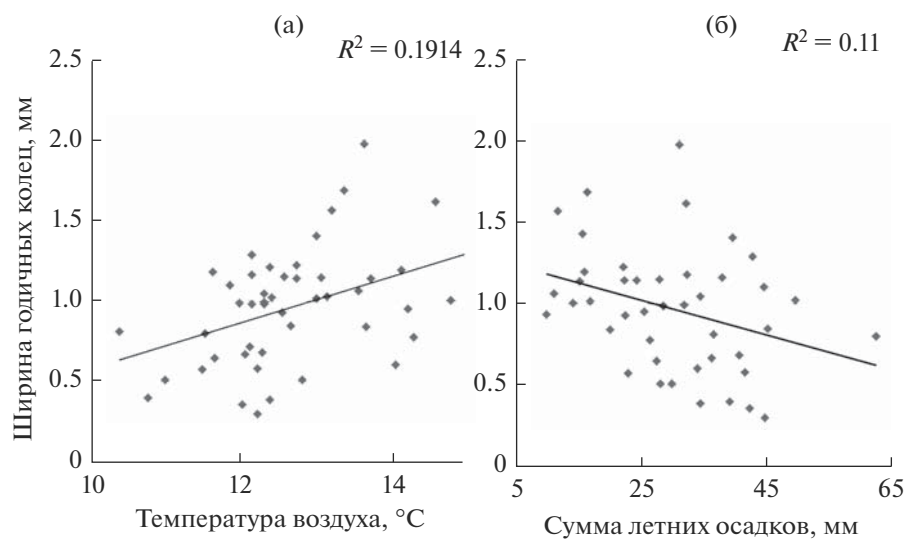


Рис. 9. Связь между приростом на участке КС и средней летней температурой на метеостанции Тээли (А); связь между приростом на участке КС и суммой летних осадков на метеостанции Тээли (В).

Fig. 9. Correlation between tree-ring growth in the study area КС and average summer temperature at the Teeli meteorological station (А); correlation between tree-ring growth in the study area КС and summer precipitation at the Teeli meteorological station (В).

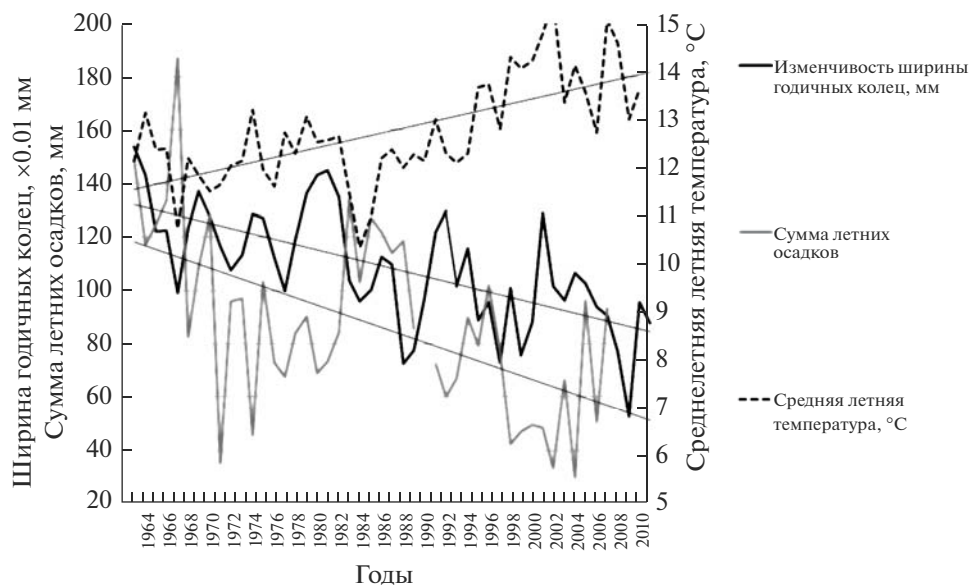


Рис. 10. Изменчивость ширины годичных колец на участке МТ, ход средней летней температуры и суммы летних осадков на метеостанции Мугур–Аксы.

Fig. 10. Annual tree-rings width variability in the study area MT, average summer temperature and summer precipitation at the Mongun–Taiga meteorological station.

ницы леса, о чем свидетельствует относительно молодой возраст деревьев (30–40 лет), большое количество подроста и в целом “наступательный” характер верхней границы леса.

В пределах высокогорного массива МТ наблюдается несколько иная картина. Снижение прироста приходится на период с середины 40-х гг. XX в. по настоящее время. Кроме того, наблюдаются положительная связь с суммой летних осадков, отрицательная — со средними летними температурами (рис. 10).

Из рис. 11 также видно, что наиболее высокие значения прироста соответствуют интервалу значений средней летней температуры 12–13°C, однако тем же значениям соответствуют также и очень низкие значения прироста (значения на графике выделены черным цветом).

Это свидетельствует о том, что кроме средней летней температуры на прирост значительно влияет какой-то другой фактор, особенно в оптимальном интервале температур. Таким фактором, по-видимому, является количество атмосферных осадков, наибольшее количество которых на Монгун-Тайге приходится на летние месяцы. Перераспределение осадков по формам рельефа и склонам разных экспозиций, в сущности, и является лимитирующим фактором для роста деревьев в условиях аридного типа высотной поясности. Чтобы оценить влияние этого фактора, рассмотрим структуру данных по этому участку подробнее.

В ходе исследований в пределах участка МТ были заложены две пробные площадки (рис. 12). На обеих площадках лесные массивы расположены в ложбинах, однако на второй площадке лес занимает большую по площади и крутизне ложбину, что обеспечивает ей большую увлажненность, а деревьям — более благоприятные условия произрастания.

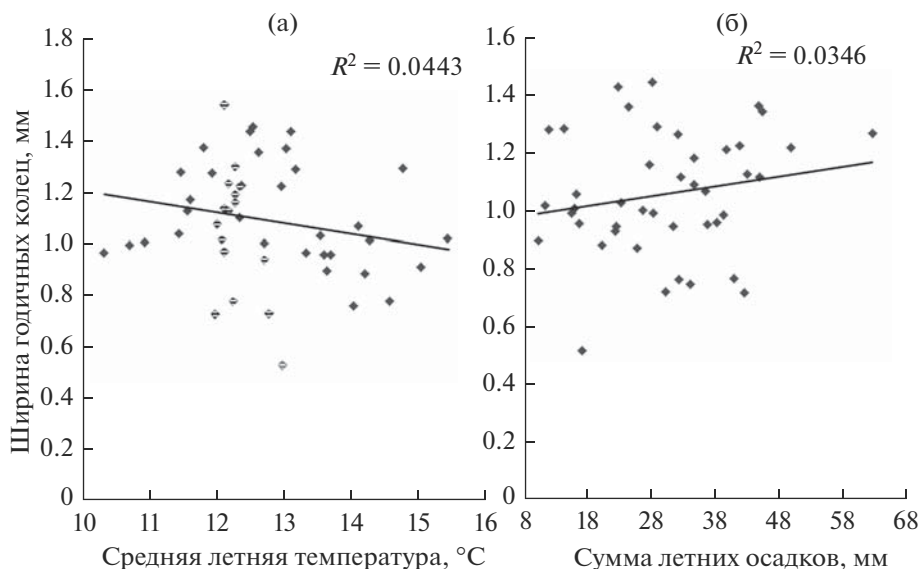


Рис. 11. Связь между приростом на участке МТ и средней летней температурой на метеостанции Мугур–Аксы (А); линейная зависимость между приростом на участке МТ и суммой летних осадков на метеостанции Мугур–Аксы (В).

Fig. 11. Correlation between tree-ring growth in the study area MT and average summer temperature at the Mongun–Taiga meteorological station (A); linear relationship between tree-ring growth in the study area MT and summer precipitation at the Mongun–Taiga meteorological station.

Как показано на трехмерной диаграмме зависимости прироста от температуры и осадков, в первом случае (А) высокий прирост более жестко лимитирован количеством осадков, на второй площади (В) радиальный прирост менее зависим от количества осадков, что подтверждает значительную обусловленность роста деревьев в пределах массива перераспределением влаги за счет особенностей рельефа.

Считается, что в горных районах нижняя граница леса определяется, в основном, степенью увлажнения, тогда как на верхней границе признаком, лимитирующим прирост деревьев, является температура воздуха за летний период. Однако на участке МТ нижняя и верхняя границы леса “смыкаются”, образуя всего лишь полосу произрастания древесной растительности в диапазоне высот 2000–2400 м, а лес оказывается “зажат” между двумя лимитирующими факторами: увлажненностью и оптимальной летней температурой.

ВЫВОДЫ

Дендроклиматические исследования, проведенные на верхнем пределе распространения древесной растительности в горах Западной Тувы, показали, что, несмотря на существующий тренд повышения температуры, наблюдаемый по данным ряда метеостанций, динамика прироста деревьев на верхней границе леса отражает эти изменения по-разному. К сожалению, для исследуемой территории, сеть метеорологических станций недостаточно плотна, и данные некоторых участков сопоставлялись с данными наблюдений одной и той же метеостанции. Поэтому выводы об увлажненности участков основывались на косвенных признаках, таких как присутствие в качестве примеси кедра, предъявляю-

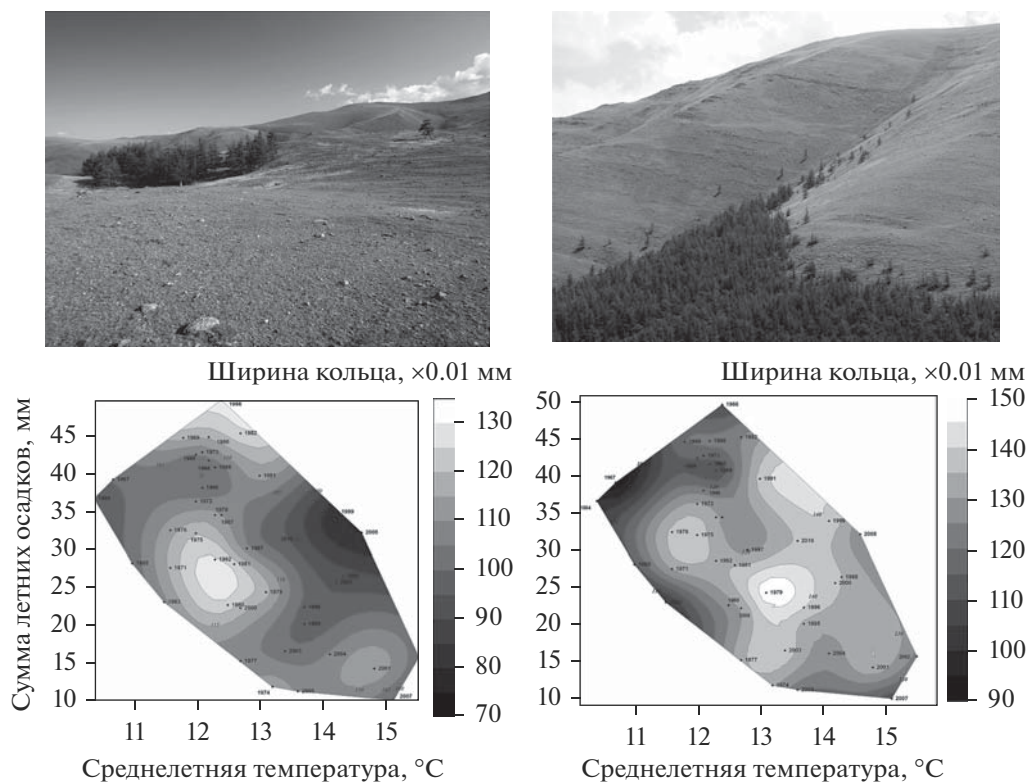


Рис. 12. Зависимость прироста от средней летней температуры и суммы летних осадков на точках отбора образцов в пределах участка МТ.

Fig. 12. Dependence of tree-ring growth on average summer temperature and summer precipitation for sampling points within MT study area.

щего повышенное требование к влажности [11]; произрастание деревьев по водоразделам; образование целостной полосы леса в структуре высотной поясности.

В работе были рассмотрены три участка верхней границы леса: участок на северо-западе Тувы, в пределах горной системы Западного Саяна (КС); участок на южном макросклоне хребта Западный Танну-Ола (ЭХ); участок в пределах высокогорного массива Монгун-Тайга (МТ). По результатам проведенных исследований можно обозначить ряд закономерностей. Принято считать, что повышение летних температур ведет к увеличению прироста и подъему высотных отметок верхней границы леса. В пределах более увлажненных участков КС и ЭХ действительно наблюдается положительная зависимость прироста от средних летних температур, при этом с осадками связь отрицательна. Можно говорить также и о поднятии верхней границы леса, так как возраст деревьев составляет в среднем 30–40 лет, отмечается много подроста по всему профилю.

В более засушливых условиях участка МТ увеличение прироста определяется сочетанием оптимальной среднегодовой температуры (12–13 $^{\circ}\text{C}$) и максимальных осадков; при этом как увеличение, так и уменьшение температур отрицательно сказывается на приросте.

сте. Таким образом, небольшие участки леса, произрастающего на массиве МТ, находятся одновременно и на верхней, и на нижней границах леса, попадая под действие сразу двух лимитирующих факторов: увлажненности и летней температуры. При общем тренде повышения температуры и уменьшения осадков смещения предела произрастания деревьев вверх по склону не фиксируется, лес удерживает прежние границы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров А.Ю. Климатически обусловленный радиальный рост хвойных в верхней части лесного пояса Семинского хребта (Центральный Алтай) // Журн. Сибирского федерального университета. Сер. Биология. 2009. Т. 2. № 1. С. 30–37.
2. Бочаров А.Ю. Структура и динамика высокогорных лесов Северо-Чуйского хребта (Горный Алтай) в условиях изменения климата // Вестн. Томского Государственного Университета. Сер. Биология. 2011. № 352. С. 203–206.
3. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с.
4. Высокая Е.С., Дмитриев А.И., Ноженкова Л.Ф., Шишов В.В. Пространственное распределение трендов климатических параметров (XX в.) // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. Новосибирск: Наука, 2002. Вып. 1. С. 83–86.
5. Герасимова О.В., Жарников З.Ю., Кнорре А.А., Мыглан В.С. Климатически обусловленная динамика радиального прироста кедра и пихты в горно-таежном поясе природного парка “Ергаки” // Журн. Сибирского федерального университета. Сер. Биология. 2010. № 3(1). С. 18–29.
6. Горный массив Монгун-Тайга / К.В. Чистяков, Д.А. Ганюшкин, И.Г. Москаленко и др. Под ред. К.В. Чистякова. СПб: “Арт-Экспресс”, 2012. 310 с.
7. Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессах в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 208 с.
8. Журавлева О.В. Дендроиндикация изменений природной обстановки на верхней границе леса в горах Алтая: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Алтайский государственный университет. Барнаул, 2002. 21 с.
9. Истомов С.В. Современная динамика верхней границы леса в горах Западного Саяна // Горные экосистемы Южной Сибири: изучение, охрана и рациональное природопользование: материалы I межрегиональной научно-практической конференции. Труды ГПЗ “Тигерский”. Вып. 1. Барнаул. 2005. С. 211–214.
10. Окишев П.А. Динамика оледенения Алтая в позднем плейстоцене и голоцене. Томск: Изд-во ТГУ, 1982. 209 с.
11. Ойдунаа О.Ч., Ваганов Е.А., Наурзбаев М.М. Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране // Лесоведение. 2004. № 6. С. 14–24.
12. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 226 с.
13. Сыромятина М.В. Современные изменения климата и элементов высотной поясности ландшафтов Алтая: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб.: СПбГУ, 2010. 18 с.
14. Тронов М.В. О некоторых географических признаках климата в высокогорной местности // Гляциология Алтая. Томск. 1964. Вып. 3. С. 12–51.
15. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 136 с.
16. Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L., Ranson K.J. Climate-induced tree-line evolution in southern Siberia // Scandinavian J. Forest Research. 2010. № 25. P. 446–454.
17. Rinn F. TSAP V3.5. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
18. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurements // Tree-Ring Bull. 1983. V. 44. P. 69–75.

Some Results of Tree-ring Analysis at the Upper Timberline in the Mountains of Western Tuva

M. A. Kolunchukova^{1, *} and A. I. Reznikov^{2, **}

¹*Ioganson St. Petersburg State Academy Art Lyceum, Saint-Petersburg, Russia*

²*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

**e-mail: kolun4ukova@yandex.ru*

***e-mail: ar1725-2@mail.ru*

The purpose of this research was an analysis of the impact of main climatic factors on tree growth and current treeline dynamics under the climate changes in the mountains of Western Tuva. Tree-ring width chronologies were built based on larch samples (*Larix sibirica*) of living trees from the upper timberline, the chronologies were compared, their statistics were estimated, and correlation with temperatures and precipitations were received. Correlations between chronologies and climatic factors revealed different climatic influences on radial growth along a north-south gradient in the study area. In conditions of sufficient moisture tree ring width correlates positively with average summer temperatures and negative with precipitations.

Keywords: treeline, dynamic of tree growth, dendrochronology, mountains of Western Tuva, summer temperature

REFERENCES

1. *Bocharov A. Yu.* Klimatichesky obuslovlennyy radial'nyy rost xvojnyx v verxnej chasti lesnogo poyasa Seminskogo xrebt (Central'nyy Altaj) // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser. Biologiya. 2009. T. 2. № 1. S. 30–37.
2. *Bocharov A. Yu.* Struktura i dinamika vysokogornyx lesov Severo-Chujnskogo xrebt (Gornyy Altaj) v usloviyax izmeneniya klimata // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Biologiya. 2011. № 352. S. 203–206.
3. *Vaganov E.A., Shashkin A.V.* Rost i struktura godichnyx kolec xvojnyx. Novosibirsk: Nauka, 2000. 232 s.
4. *Vysokaya E.S., Dmitriev A.I., Nozhnikova L.F., Shishov V.V.* Prostranstvennoe raspredelenie trendov klimaticheskix parametrov (XX vek) // Osnovnye zakonomernosti global'nyx i regional'nyx izmenenij klimata i prirodnoj sredy v pozdnem kajnozoe Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 2002. Vyp. 1. S. 83–86.
5. *Gerasimova O.V., Zharnikov Z. Yu., Knorre A.A., Myglan V.S.* Klimaticheski obuslovlennaya dinamika radial'nogo prirosta kedra i pity v gorno-taezhnom poyase prirodnogo parka "Ergaki" // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser. Biologiya. 2010. № 3(1). S. 18–29.
6. Gornyy massiv Mongun-Tajga / K.V. Chistyakov, D.A. Ganyushkin, I.G. Moskalenko i dr. Pod red. K.V. Chistyakova. SPb.: "Art-E'kspres", 2012. 310 s.
7. *Gorchakovskiy P.L., Shiyatov S.G.* Fitoindikatsiya usloviy sredy i prirodnix processax v vysokogor'yax. M.: Nauka, 1985. 208 s.
8. *Zhuravleva O.V.* Dendroindikatsiya izmenenij prirodnoj obstanovki na verxnej granice lesa v gorax Altaya: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Altajskij gosudarstvennyy universitet. Barnaul, 2002. 21 s.
9. *Istomov S.V.* Sovremennaya dinamika verxnej granicy lesa v gorax Zapadnogo Sayana // Gornye e'kosistemy Yuzhnoj Sibiri: izuchenie, ohrana i racional'noe prirodrpol'zovanie: materialy I mezhregional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. Trudy GPZ "Tigreckij". Vyp. 1. Barnaul. 2005. S. 211–214.
10. *Okishev P.A.* Dinamika oledeneniya Altaya v pozdnem plejstocene i golocene. Tomsk: Izd-vo TGU, 1982. 209 s.
11. *Ojdupaa O.Ch., Vaganov E.A., Naurzbaev M.M.* Dlitel'nye izmeneniya letnej temperatury i radial'nyy rost listvennicy na verxnej granice lesa v Altae-Sayanskoy gornoj strane // Lesovedenie. 2004. № 6. S. 14–24.
12. *Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I.* Klimat i gornye lesa Yuzhnoj Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1986. 226 s.

-
13. *Syromyatina M.V.* Sovremennye izmeneniya klimata i e'lementov vysotnoj poyasnosti landshaftov Altaya: avtoref. dis. ... kand.geogr.nauk. Spb.: SpbGU, 2010. 18 s.
 14. *Tronov M.V.* O nekotoryx geograficheskix priznakax klimata v vysokogornoj mestnosti // Glyaciologiya Altaya. Tomsk, 1964. Vyp. 3. S. 12–51.
 15. *Shiyatov S.G.* Dendroxronologiya verxnej granicy lesa na Urale. M.: Nauka, 1986. 136 s.
 16. *Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L., Ranson K.J.* Climate-induced tree-line evolution in southern Siberia // Scandinavian J. Forest Research. 2010. № 25. P. 446–454.
 17. *Rinn F.* TSAP V3.5. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
 18. *Holmes R.L.* Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurements // Tree-Ring Bull. 1983. V. 44. P. 69–75.