

ЗАГЛУБЛЕННЫЙ МАКСИМУМ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОЗЕРАХ С УСТОЙЧИВОЙ СТРАТИФИКАЦИЕЙ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО МОРЯ

Краснова Елена Дмитриевна

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Воронов Димитрий Анатольевич

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН и Института физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. На побережье Белого моря в результате постгляциального подъема берега образовалось множество водоемов, в разной степени изолированных от моря. Общая особенность этих водоемов – слоистая гидрологическая структура и устойчивая стратификация, вплоть до меромиксии. В этих водоемах нередко наблюдается заглубленный температурный максимум, которому может быть два объяснения: избирательный прогрев слоя с более высокой соленостью или остаточное тепло после охлаждения поверхности водоема. На основании анализа профилей температуры, полученных в ходе многолетнего мониторинга в четырех озерах, подтвердилась вторая гипотеза.

Ключевые слова: соленые озера, стратификация, меромиксия, отделяющиеся водоемы, температура, заглубленный максимум температуры, Белое море

Annotation. On the coast of the White Sea, as a result of the postglacial uplift of the coast, many salt lakes were formed, isolated to a different extent from the sea. The common feature of these bodies of water is a layered hydrological structure and stable stratification, up to meromixis. In these water bodies, a deep temperature maximum is often observed, to which there can be two explanations: selective heating of the layer with higher salinity or residual heat after cooling of the lake surface. Based on the analysis of temperature profiles obtained during long-term monitoring in four lakes, the second hypothesis was confirmed.

Keywords: salt lakes, stratification, meromixis, lakes separated from the sea, temperature, deep temperature maximum, White Sea

Введение

Заглубленный максимум температуры (ЗМТ) – феномен, который возникает в некоторых стратифицированных водоемах с пресной водой на поверхности и соленой воде у дна, когда более прогретым оказывается нижний слой, что отличает их от водоемов с прямой температурной стратификацией в теплое время года. Для них применяют термин «гелиотермические», подчеркивающий происхождение тепла от солнечного прогрева. ЗМТ встречается в естественных водоемах и в искусственных «солнечных прудах», в которых под слоем пресной воды располагается концентрированный

солевой раствор, где аккумулируется солнечное тепло, а пресный слой предохраняет от его утечек через конвекцию. Интересно, что гелиотермические озера встречаются не только в условиях жаркого климата, но и в озерах Антарктики, круглый год покрытых толстым льдом. Например, в меромиктическом озере Ванда, у которого на глубине 60 м температура воды превышает 20°C [1], или в соленом озере Бонни с температурой +4...+6°C на глубине 10–20 м при том, что у поверхности она соответствует точке замерзания (Spiegel, Priscu, 1996). По мнению некоторых лимнологов для появления ЗМТ разница в плотности слоев должна быть не менее 15 г/л [2]. На примере камчатских стратифицированных лагун было рассчитано, что развитию летнего ЗМТ способствуют такие условия: малая глубина верхнего перемешиваемого слоя (менее 2 м), прозрачная вода, максимум активности ветра в дневное время и безоблачная погода [3].

На побережье Белого моря из-за быстрого поднятия берега, которое началось после таяния ледника и продолжается по сей день со скоростью несколько мм в год [5, 6, 7], многие заливы постепенно отделяются от моря и превращаются в озера. На этом пути водоемы проходят через стадию с устойчивой плотностной стратификацией, вплоть до меромиксии. Наблюдения за температурным режимом показали, что во всех озерах бывают периоды с ЗМТ. Первоначально мы предполагали, что это результат избирательного прогрева соленого водного слоя за счет теплообмена с черным грунтом, который должен хорошо нагреваться от солнца [8]. Однако детальные наблюдения за температурной стратификацией заставили нас пересмотреть свое мнение.

Материал и методы

Наблюдения проводили на четырех водоемах. 1. Лагуна на Зеленом мысе (66°31'50" N, 33°5'41" E) – соленый водоем глубиной 6,5 м, отделенный от моря каменистым порогом, через который при каждом приливе на самой высокой его фазе в лагуну поступает морская вода. Зимой на пороге нарастает ледовый барьер, который временно изолирует водоем от моря. 2. Озеро Еловое (66°28'55" N, 33°16'45" E) – меромиктический водоем с наибольшей глубиной 5 м, пресным поверхностным слоем и соленой водой начиная с глубины 1,5 м. 3. Озеро Трёхцветное (66°35'37" N, 32°58'48" E) – меромиктический водоем глубиной 7 м с пресной водой до глубины 0,5 м, под которой соленость постепенно увеличивается ко дну до величины такой же, как в море. 4. Озеро Большие Хрусломены (66°43'12" N, 32°51'46" E) – меромиктический водоем глубиной около 20 м, в изоляции которого приняли участие люди, пытаясь из морского залива получить пресный водоем, для чего мелководный порог был надстроен валунами; в озеро ежедневно поступает прилив, колебания уровня озера около 10 см; верхний перемешиваемый слой до глубины 2 м имеет соленость 4–7‰, ниже соленость посте-

пенно нарастает и возле дна составляет 23%.

Температуру воды (Т) измеряли кондуктометрами WTW ProfiLine Con 197i или WTW 330i в пробе, отобранной погружным насосом с размеченным кабелем, немедленно после заполнения сосуда водой с заданной глубины. Пробы отбирали с шагом 0,5 м по вертикали от поверхности до дна.

Результаты

В лагуне на Зеленом мысе наблюдениями охвачено 9 лет с 2010 по 2018 гг. В этом водоеме в начале лета (июнь – первая половина июля) наиболее прогретый слой – поверхностный. В конце июля – начале августа максимальные значения Т обычно приходятся либо на поверхностный слой, либо на глубину 0,5 м. Рекордное для этого водоема значение $T = 24,8^{\circ}\text{C}$ отмечено возле поверхности воды 24 июля 2014 г. ЗМТ возникает, когда поверхность водоема начинает охлаждаться. Первыми остывают верхние слои, а нижележащие сохраняют тепло дольше (рис. 1). В конце сентября ЗМТ проявляется наиболее отчетливо и располагается глубоко. В 2013 г. он находился на 4,5 м и в 2018 г. на 4,2 м. Разность солёности между поверхностным слоем и областью ЗМТ составляет 2,2-4,9‰; разность $T = 0,7$ -5,1 градуса.

В озере Еловом наблюдения проводили с 2011 по 2018 гг. С начала лета до начала августа наиболее прогретый слой – поверхностный, однородный благодаря ветровому перемешиванию, которое распространяется до 0,5-1 м (рис. 2). В 2014, 2015, 2016 и 2018 гг. максимальный нагрев в нем приходился на июль, а в 2013 и 2017 гг. – на первую половину августа. В 2012 г. максимальная Т поверхностного слоя была зарегистрирована в июне. Максимальная за все годы наблюдений Т в этом водоеме $24,8^{\circ}\text{C}$ была зарегистрирована 27 июля 2014 г. возле поверхности. ЗМТ обычно возникает в конце августа – сентябре и располагается ниже галоклина на глубине 1,5-2,7 м при солёности 14-24,1‰. Этот горизонт находится в аэробной освещенной зоне. Разность солёности

между горизонтом с ЗМТ и поверхностным слоем составляет 13,7-24,1. Скачок Т между миксолимнионом и заглубленным максимумом может составлять до 11 градусов.

В озере Трёхцветном наблюдения охватывают 9 лет с 2010 по 2018 гг. В летнее время наиболее прогретым, как правило, являлся поверхностный слой (рис. 3). Наибольшая за все время наблюдений за этим озером $T = 25,1^{\circ}\text{C}$ была зарегистрирована 27 июля 2016 г. Зона ветрового перемешивания с начала лета к осени увеличивается с 1 м до 1,5-1,7 м. Ниже этой глубины расположен скачок солёности, но локальный максимум Т образуется не прямо под ним, а немного глубже на глубине 1,4-2,5 м. Разница в солёности между миксолимнионом и горизонтом ЗМТ составляет 4,5-15,4 единиц. ЗМТ появляется в конце августа – октябре почти каждый год; его не было только в холодном 2015 году. Разность Т между миксолимнионом и ЗМТ – 1,4-4,6 $^{\circ}\text{C}$. В некоторых случаях он располагался непосредственно в зеленом слое с густой взвесью зеленых серных бактерий (август 2013 и 2014 г, сентябрь 2013, 2018 и 4 сентября 2017), но чаще – под ним в сероводородной области (август 2016, 2 половина сентября 2017). Осенью по мере охлаждения верхней части водоема ЗМТ постепенно опускается и его величина уменьшается. Поскольку пик появляется не при нагревании водоема, а при его охлаждении, он является не результатом избирательного прогрева, а слоем с остаточным теплом, который просто не успел охладиться.

В озере Большие Хрусломены наблюдения проводятся с 2010, но в силу его удаленности от ББС МГУ они не столь регулярны, как в остальных озерах, всего один-три раза в год и с перерывами. Тем не менее, мы застали два случая ЗМТ. В этом водоеме поверхностный слой хорошо прогревается и летом он самый теплый (рис. 4). Наибольшая зарегистрированная нами $T = 21,7^{\circ}\text{C}$. Оба случая ЗМТ зарегистрированы в сентябре (2017 и 2018 гг.), он находился на глубине 3-3,25 м. Этот уровень приходится на пикноклин, разность в солёности между поверхностным слоем и уровнем ЗМТ составляла

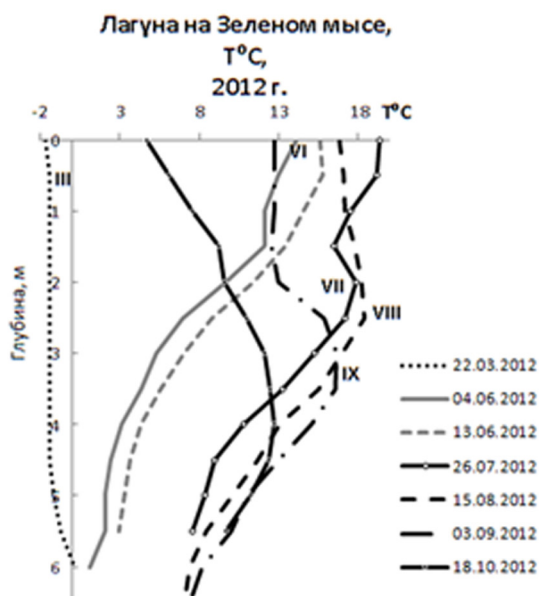


Рис. 1. Вертикальные профили температуры в лагуне на Зеленом мысе в 2015 году

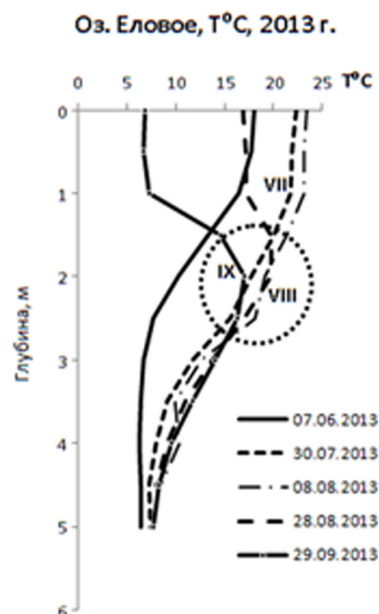


Рис. 2. Вертикальные профили температуры в озере Еловом в 2015 году

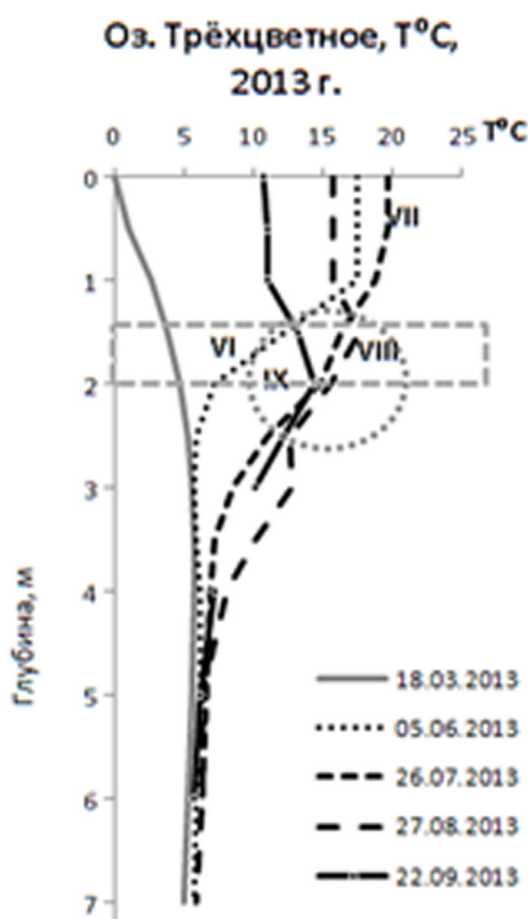


Рис. 3. Вертикальные профили температуры в лагуне на Зеленом мысе в 2013 году.

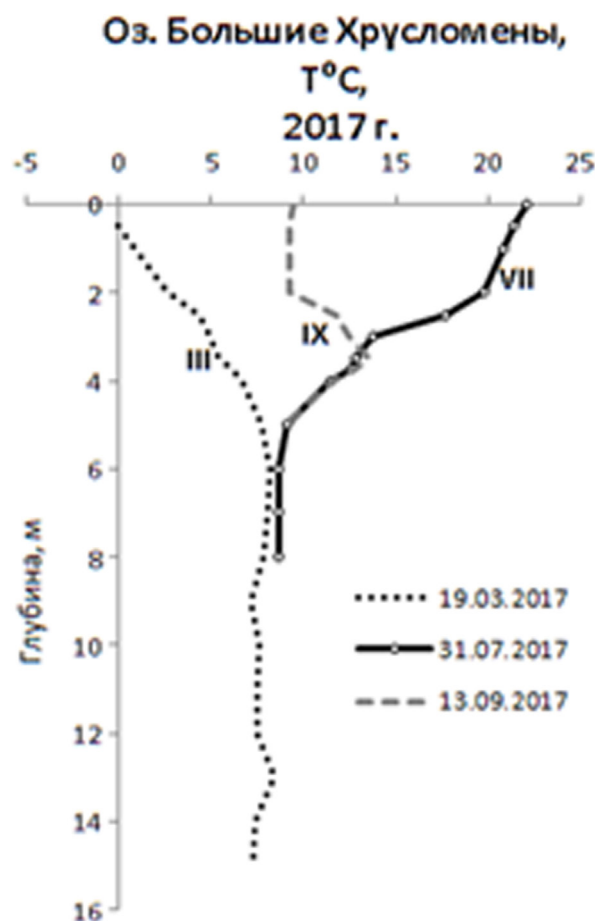


Рис. 4. Вертикальные профили температуры в оз. Большие Хрусломены в 2017 году.

Таблица 1.

Термохалинные характеристики беломорских водоемов с заглубленным максимумом температуры

Водоем	Лагуна на Зеленом мысе	Оз. Б. Хрусломены	Оз. Трёхцветное	Оз. Еловое
Параметр				
Глубина ЗМТ	1,5-4,5	3-3,25	1,4-2,5	1,5-2,7
Температура в ЗМТ	12,7-22,7	13,5-15°C	10,6-17,8	11,5-19,8
Наибольшая за все время наблюдений Т возле поверхности	24,8	21,7°C	25,1	24,8
Разность солёности между поверхностью и ЗМТ	1,5-5,1	7,5-7,8	5,8-15,4	13,7-24,1
Разность температуры между поверхностью и ЗМТ	0,7-5,1	3,8-4°	1,4-4,6	1,5-11,7

12-13 единиц. В этом водоеме в летнее и осеннее время свет доходит до глубины 4,1-4,6 м, и ЗМТ находился в освещенной зоне. Условия на этом горизонте аэробные. На примере этого водоема особенно наглядно, что ЗМТ связан с более медленным охлаждением гипolimниона по сравнению с миксолимнионом.

Обсуждение

Во всех четырех водоемах ЗМТ возникает в конце лета и осенью при охлаждении поверхностного слоя воды. ЗМТ располагается в зоне, где солёность больше, чем на поверхности. Минимальная разность солёности между поверхностью и зоной ЗМТ (1,5‰) зарегистрирована в соленой лагуне на Зеленом мысе, которая находится на самой начальной стадии изоляции от моря (табл. 1). Самая большая разность солёности – в меромиктическом озере Еловом (13,7-24,1‰). Глубина

расположения ЗМТ существенно больше в тех водоемах, которые постоянно сообщаются с морем.

Все водоемы, где был зарегистрирован ЗМТ, удовлетворяют, по крайней мере, двум требованиям, сформулированным В.А. Степаненко с коллегами [3]: малая глубина верхнего перемешиваемого слоя (менее 2 м) и прозрачная вода. И только два из них соответствуют критерию 14 г/л, указанному А.Н. Егоровым.

Вывод

Таким образом, в беломорских стратифицированных водоемах гелиотермический эффект отсутствует. Эффект ЗМТ в них связан не с избирательным нагревом нижнего слоя, а с охлаждением поверхностного.

Работа поддержана грантом РФФИ №19-05-00377.

Список литературы:

1. Vander Schaaf N. A., Cunningham A. M. G., Cluff B. P., Kraemer C. Jo K., Reeves Ch. L., Riester C. J., Slater L. K., Madigan M. T., Sattley W. M. Cold-Active, Heterotrophic Bacteria from the Highly Oligotrophic Waters of Lake Vanda, Antarctica. // *Microorganisms*. – 2015. V. 3. – #3. – P. 391–406.
2. Егоров А.Н. Использование соленых озер России как альтернативных источников энергетических, биологических и минеральных ресурсов – залог устойчивого развития России. – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://textarchive.ru/c-2412733-pall.html> (дата обращения: 04.02.2019).
3. Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Yu., Gorin S. L., Lykossov V. N., Kulyamin D. V. Mid-depth temperature maximum in an estuarine lake. // *Environmental Research Letters*. – 2018. – V. 13. # 3, 035006.
4. Spiegel H. R., Prisco J. C. Evolution of temperature and salt structure of Lake Bonney, a chemically stratified Antarctic lake. // *Hydrobiologia*. – 1996. – 321. – P. 177–190.
5. Романенко Ф.А., Шилова. О.С. Последлениковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озёрно-болотных отложений полуострова Киндо. // *Доклады Академии наук*. – 2012. – Т. 442. №4. – С.: 544–548.
6. Репкина Т. Ю., Зарецкая Н.Е., Субетто Д.А., Потахин М.С., Кунгаа М.Ч., Новикова А.В., Леонтьев П.А. Морфодинамика берегов северо-запада Онежского полуострова Белого моря в голоцене. Губа Конюхова. // *Труды Карельского научного центра РАН*. – 2018. – № 1. – С. 3–22.
7. Репкина Т.Ю., Зарецкая Н.Е., Шилова О.С., 2018-б. Двинский залив Белого моря в позднеледниковье – раннем голоцене. // *Геоморфология*. – 2018. – №3. С. 71–88. DOI: 10.7868/S0435428118020062
8. Краснова Е. Д. Озеро Кисло-Сладкое. В кн.: Путешествия по Киндо-мысу. Очерки о природе и науке Беломорской биологической станции Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. – Тула: «Гриф и К», 2008. – С. 85–89.

Министерство науки и высшего образования РФ
Правительство Ульяновской области
Ульяновское областное отделение
Русского географического общества
Институт озероведения РАН
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
педагогический университет имени И.Н. Ульянова»

Трешниковские чтения 2019

**Современная географическая картина мира
и технологии географического образования**

Материалы
всероссийской научно-практической конференции
с международным участием,
посвящённой памяти знаменитого российского океанолога,
исследователя Арктики и Антарктики,
академика Алексея Фёдоровича Трешникова

Оргкомитет конференции

Почетный председатель: Артур Николаевич Чилингаров – Первый вице-президент РГО, доктор географических наук, член-корреспондент РАН.
Сопредседатели: Сергей Иванович Морозов – Губернатор Ульяновской области;
Тамара Владимировна Девяткина – временно исполняющий обязанности ректора ФГБОУ ВО «УлГПУ имени И.Н. Ульянова», кандидат экономических наук, доцент, Заслуженный учитель РФ, Председатель УОО РГО.
Заместители председателя: Екатерина Владимировна Уба – первый заместитель Председателя Правительства Ульяновской области; Игорь Игоревич Егоров – председатель координационного совета УОО РГО, председатель Счетной палаты Ульяновской области;
Члены оргкомитета: Сергей Сергеевич Панчин – Глава города Ульяновска;
Наталья Владимировна Семенова – Министр образования и науки Ульяновской области;
Алексей Александрович Шкляр – заместитель Министра образования и науки Ульяновской области;
Дмитрий Васильевич Федоров – Министр природы и цикличной экономики Ульяновской области, член Попечительского совета УОО РГО;
Сергей Александрович Андрианов – генеральный директор гостиницы «Венец»;
Ирина Назимовна Тимошина – проректор по научной работе ФГБОУ ВО «УлГПУ имени И.Н. Ульянова», д.п.н., профессор;
Андрей Александрович Вильчик – проректор по административно-хозяйственной работе и безопасности ФГБОУ ВО «УлГПУ имени И.Н. Ульянова»;
Даниил Анатольевич Фролов – декан естественно-географического факультета ФГБОУ ВО «УлГПУ имени И.Н. Ульянова», к.б.н., доцент;
Владимир Николаевич Федоров – заместитель Председателя УОО РГО, к.г.н., доцент;
Александр Иванович Золотов – заместитель Председателя УОО РГО, к.г.н., доцент;
Елена Юрьевна Анисимова – заведующий кафедрой географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ имени И.Н. Ульянова», к.и.н., доцент;
Дмитрий Михайлович Арапов – Председатель молодежного клуба УОО РГО.

Программный комитет конференции

Председатель:
Александр Александрович Лобжанидзе – доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой экономической и социальной географии ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет», член Ученого Совета ВОО РГО.
Члены программного комитета:
Дмитрий Викторович Богачёв – кандидат географических наук, доцент кафедры географии, экологии и общей биологии ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева».
Сергей Вячеславович Левыкин – доктор географических наук, профессор РАН, заведующий отделом степеведения и природопользования ФБГУН «Институт степи Уральского отделения Российской академии наук».
Дорин Думитров Лозовану – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Национального музея этнографии и природы Молдовы, Академии наук Молдовы, Президент Ассоциации географии и этнологии.
Любовь Васильевна Маловичко – доктор биологических наук, профессор ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева».
Дмитрий Владимирович Молодцов – ведущий редактор Центра естественно-научных дисциплин издательства «Русское слово», учитель высшей квалификационной категории, лауреат «Гранта мэра Москвы» в области образования.
Инна Витальевна Никонорова – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой физической географии и геоморфологии ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», Председатель Чувашского республиканского отделения ВОО РГО.
Игорь Витальевич Новиков – кандидат геолого-минералогических наук, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ФБГУН «Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка» РАН.
Сергей Викторович Панков – доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и землеустройства ФБГУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина».
Шамиль Рауфович Поздняков – доктор географических наук, директор ФБГУН «Институт Озероведения Российской академии наук».
Вячеслав Владимирович Сироткин – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой ландшафтной экологии ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».
Алексей Михайлович Токранов – доктор биологических наук, директор, заведующий лабораторией гидробиологии ФБГУН «Камчатский филиал Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения РАН».

Редакционная коллегия

Ирина Назимовна Тимошина – проректор по научной работе ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова», д.п.н., профессор;
Елена Юрьевна Анисимова – заведующий кафедрой географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова», к.и.н., доцент;
Елена Александровна Артемьева – д.б.н., профессор кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Марина Юрьевна Аксенова – к.г.н., доцент кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Азат Корбангалиевич Идиатуллин – к.и.н., доцент кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Екатерина Николаевна Егоренкова – к.б.н., доцент кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Михаил Владимирович Корепов – к.б.н., доцент кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Олег Геннадьевич Зотов – к.б.н., старший преподаватель кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Наталья Юрьевна Летярина – ассистент кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Ираида Евгеньевна Канцерова – старший преподаватель кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова».

Рецензенты

Юлия Юрьевна Красноперова – д.б.н., профессор кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова»;
Дмитрий Юрьевич Семенов – к.б.н., доцент кафедры биологии, экологии и природопользования ФГБОУ ВО «УлГУ».

Статьи публикуются в авторской редакции

Т 66 **Трешниковские чтения – 2019: Современная географическая картина мира и технологии географического образования:** мат-лы. всерос. науч. – практ. конф. с междунар. участ. / под. ред. И.Н. Тимошиной, Е.Ю. Анисимовой, Е.А. Артемьевой и др. – Ульяновск: ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И.Н. Ульянова», 2019. – 310 с.

ISBN 978-5-86045-989-2

В сборнике представлены оригинальные доклады авторов по основным направлениям конференции: Физическая география в современном мире: проблемы и перспективы, Социально-экономическое развитие территорий и гуманитарная география, Геоэкологические проблемы ландшафтов, Современные геолого-палеонтологические исследования, Геоэкологические исследования водных объектов и охрана их биоразнообразия, Непрерывное географическое образование.

УДК 55:372.8
ББК 26+74.262.6

© Коллектив авторов, текст, 2019
© УлГПУ им. И.Н. Ульянова, 2019