

ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ОЗЁР П-ОВА КИНДО ЗИМОЙ 2024 ГОДА

В.А. Ефимов^{1,2}, Л.Е. Ефимова¹, А.Н. Василенко^{1,2}, В.А. Ломов^{1,2}, И.А. Репина^{1,2},
А.А. Сазонов^{1,2}, Н.Л. Фролова^{1,2}, Е.Д. Краснова¹, Д.А. Воронов¹,
Е.М. Аландаренко¹, Д.А. Глызин¹, И.А. Кенсовский¹, Д.А. Кириллов¹,
У.А. Конева¹, А.А. Кочнев¹, А.Д. Кузнецова¹, И.А. Кузнеченко¹,
С.Б. Подчезерцева¹, Т.А. Пойменова¹, У.А. Романова¹, И.М. Сенин¹,
С.С. Соловьёва¹, А.Д. Теплякова¹, К.К. Фаев¹, И.А. Шереметьев¹

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, an_vasilenko24@mail.ru

² ИФА им. А.М. Обухова РАН

THE STUDY OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE KINDO PENINSULA MEROMICTIC LAKES IN WINTER PERIOD OF 2024

V.A. Efimov^{1,2}, L.E. Efimova¹, A.N. Vasilenko^{1,2}, V.A. Lomov^{1,2}, I.A. Repina^{1,2},
A.A. Sazonov^{1,2}, N.L. Frolova^{1,2}, E.M. Alandarenko¹, D.A. Glyzin¹, I.A. Kensovskii¹,
D.A. Kirillov¹, U.A. Koneva¹, A.A. Kochnev¹, A.D. Kuznetsov¹, I.A. Kuznechenko¹,
S.B. Podchezertseva¹, T.A. Poimenova¹, U.A. Romanova¹, I.M. Senin¹,
S.S. Solovyova¹, A.D. Teplyakova¹, K.K. Faev¹, I.A. Sherementiev¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow

² A.M. Obukhov institute of Atmosphere Physics of RAS, Moscow

Аннотация. Меромиктические озёра полуострова Киндо – уникальные природные объекты, позволяющие проследить все стадии отделения залива от моря и превращения его в пресноводный водоём. Гидрохимические характеристики рассматриваемых в работе озёр изучаются в течении 10 лет, начиная с 2014 года. Зимой 2024 года наибольшие значения pH (>7) наблюдались в ковшовых губах и лагуне на Зелёном Мысу. В пресноводных озёрах они составили менее 6,5. Содержание фосфора и кремния в придонных слоях меромиктических озёр увеличилось по сравнению с результатами съёмок 2014-2015 гг. (до 11- 17 мг/л), тогда как в пресных озёрах, напротив произошло их уменьшение (27-79 мкг/л). В придонных слоях меромиктических озёр отмечается преобладание органических форм фосфора. Солевой состав озёр незначительно изменился за 10 лет. Пресноводные озёра относятся к гидрокарбонатному классу. Катионный состав смешанный. Придонные горизонты меромиктических озёр и солёные озёра – к хлоридному классу, натриевой группе. Таким образом, в меромиктических озёрах полуострова Киндо можно проследить тенденцию к усилению отделённости от моря. При этом, озёра, сохраняющие связь с морем (оз. Кисло-Сладкое, лагуна на Зелёном Мысу), продолжают испытывать влияние проникающих морских вод, что выражается в более близком к морским водам химическом составе.

Ключевые слова: меромиктические озёра, химический состав, биогенные элементы, главные ионы

Введение

Меромиктические озера – уникальные водоемы, отличительной особенностью гидрохимической структуры которых является ярко выраженная многолетняя стратификация с наличием слоя «вечной» стагнации. На территории полуострова Киндо, в районе Беломорской биологической станции МГУ, на данный момент обнаружено около 20 подобных водоемов. Большое количество водных объектов данного типа обусловлено высокой активностью береговых

переформирований (отчленение заливов, разрастание островов, образование перемычек в проливах) и гляциоизостатических поднятий

Химический состав меромиктических озёр определяется поступлением морских солёных вод, проникающих через перемычку, отделяющую озеро от моря, пресным стоком с водосбора, а также химическими и биологическими процессами, происходящими в хемоклине – границе пресноводной и солёной частей. В зависимости от стадии развития озера объём каждой из водных масс изменяется. Приток морских вод или усиление пресного стока может приводить к формированию промежуточных водных масс, которые затем постепенно трансформируются.

Длительный период наблюдений за озёрами позволяет выявить химические процессы, характерные для трансформации озёр в пресноводные водоёмы и определить интенсивность их протекания. Съёмки пресноводных озёр позволяют проследить ход дальнейшей эволюции бывших морских заливов, а также процессы, происходящие на их водосборах. К наиболее интересным исследованиям меромиктических озёр можно отнести зимние съёмки, когда приток пресных вод минимален, а морское влияние формируется в результате фильтрации солёных вод через перемычку или заплеска в результате сильных нагонов или приливов. Таким образом, целью зимних исследований экспедиции НСО кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова, проходившей в окрестностях полуострова Киндо с 27.01 по 4.02 2024 г. было – изучение химического состава пресноводных и меромиктических озёр, а также сравнение результатов с зимними съёмками 2014-2015 гг. для характеристики интенсивности их отделения от моря.

Объекты и методы

В течение экспедиции было обследовано 9 водных объектов на разной стадии отделения от моря: оз. Кисло-Сладкое (солёное; 2 станции), ковшовая губа Бухта Биофильтров (солёная; 2 станции), оз. Верхнее (пресное; 1 станция), оз. Водопроводное (пресное; 1 станция), оз. Трёхцветное (меромиктическое; 2 станции), оз. Большие Хрусломены (меромиктическое; 1 станция), оз. Нижнее Ершовское (пресное; 2 станции), оз. Верхнее Ершовское (пресное; 1 станция), лагуна на Зелёном Мысу (солёное; 2 станции).

В процессе работ на озёрах исследовались гидрохимические характеристики: электропроводность, цветность, pH, Eh, содержание биогенных элементов (Р_{мин}, Р_{орг}, Si), солевой состав (анионы HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ и катионы Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺). Лабораторные анализы (определение солевого состава методом капиллярного электрофореза [1] и анализ цветности воды и содержания биогенных элементов спектрофотометрическим методом [2]) выполнены на базе лаборатории экологической гидрохимии кафедры гидрологии суши МГУ. Остальные показатели определялись в полевых условиях при помощи портативных зондов.

Обсуждение результатов

Рассматриваемые озёра можно разделить на 3 группы. Первая группа – это пресные озёра, в которых рН соответствует значениям 6,15-6,75; вторая – меромиктические озёра, в которых присутствует пресный слой (рН 6,9-7,2) и солёный слой (рН 6,5-6,9) и третья – солёные озёра и ковшовая губа (рН 7,1-7,7). Амплитуда значений рН за аналогичные сроки измерения в 2015 году составляла 2,6 (от 5,5 до 8,1), в 2014 – 2,3 (от 5,4 до 7,7). Для меромиктических озёр характерно увеличение рН в области хемоклина до 6,9-7,4, что связано с деятельностью микроорганизмов. В лагуне на Зелёном Мысу и озере Кисло-Сладкое в поверхностных слоях наблюдаются повышенные значения рН, что может быть связано с проникновением морских солёных вод. В лагуне на Зелёном Мысу наблюдаются «морские» значения рН (7,1-7,3). При этом, водная масса озера Кисло-Сладкое трансформирована сильнее (рН 6,8-6,9), что может говорить об их разовом поступлении несколько лет назад.

Цветность воды (Cr-Co шкала), измеренная в 2024 гг. характеризуется ростом от поверхностных к придонным слоям, а также увеличением на хемоклине. Она обусловлена, главным образом, присутствием в озёра гумусовых веществ и соединений трехвалентного железа. При этом воды могут иметь разный оттенок в зависимости от наличия в них примесей. Озеро Верхнее характеризуется наиболее низкой цветностью по всей толще (72-73 б.ц.). В озерах Водопроводное и Нижнее Ершовское цветность увеличивается ко дну с 174 до 900 б.ц. В остальных озёрах сильное влияние на величину цветности оказывают органические и минеральные частицы, взвешенные в пробе и не удаляемые бумажным фильтром (d пор 12 мкм). В них наблюдается тенденция к существенному увеличению цветности ко дну. Максимальные значения также связаны с «цветным» слоем хемоклина, где наблюдается наибольшая плотность хемосинтезирующих микроорганизмов.

По результатам съёмки 2024 года в пробах воды Бухты Биофильтров и лагуны на Зеленом Мысу было выявлено значительное преобладание минерального фосфора (70-90%) над органическим (10-30%) в большей части горизонтов. Исключение составляют слои, приближенные к хемоклину (9 м и 4 м соответственно). Ниже него фиксировались практически равные концентрации минеральных и органических форм фосфора, выше него – значительное преобладание органического фосфора (до 86%). В слое с выше хемоклина с глубиной происходило уменьшение доли минерального фосфора, ниже – увеличение. Общие концентрации оставались на одном уровне (20-30 мкг/л – в бухте Биофильтров и 190-200 мкг/л – в водах лагуны на Зеленом Мысу) до слоя скачка, резко возрастающая ниже хемоклина (до 1360 мкг/л – в Бухте Биофильтров, 387 – на Зеленом Мысу). Обратная тенденция наблюдалась в меромиктических озерах, где увеличение концентраций минерального фосфора отмечалось ниже хемоклина. В этом слое многолетней стагнации происходило резкое увеличение концентраций (со 122 мкг/л до 17,5 мг/л – в водах Трехцветного озера, с 96 мкг/л до 11,7 мг/л – в оз. Большие Хрусломены). Вертикальная стратификация водной массы Кисло-Сладкого озера, сформированная в восстановительных условиях,

характеризовалась возрастанием общего содержания фосфора (с 51 до 96 мкг/л) и доли его органической формы в общей структуре (с 16 до 39%). В относительно неглубоких (2-5 м) пресных озерах наблюдалось обратная изменчивость соотношения минерального и органического фосфора, складывающаяся в условиях его малых концентраций (до 30 мкг/л) и положительного окислительно-восстановительного потенциала. По сравнению с предыдущими съёмками, в меромиктических озёрах существенно увеличились валовые концентрации фосфора ниже хемоклина, что связано с отсутствием перемешивания. Большая часть (53-67%) представлена органическими формами Р, что связано с аккумуляцией органического вещества в придонных слоях. Содержание фосфора в озёрах, связанных с морем не столь велико. Вероятно, это последствия «промыва» озёр морскими водами.

Содержание Si в пресноводных озёрах находится в диапазоне от 1 до 7 мг/л, в солёном слое меромиктических озёр и в озёрах, связанных с морем – 3-4 мг/л. Эти данные согласуются с результатами 2014-2015 гг. Основным источником кремния выступают подземные воды, вследствие чего, концентрации возрастают в придонных слоях.

Солевой состав рассматриваемых озёр не претерпел значительных изменений по сравнению со съёмками 2014-2015 гг. Так, пресноводные озёра относятся к гидрокарбонатному классу (>40%), смешанной группе [3]. Доли Ca^{2+} и Na^+ близки (12-20%). У озёр небольшой водосбор и питание в основном за счёт атмосферных осадков морского происхождения, что объясняет повышенную долю Na^+ . Существенно изменился лишь солевой состав оз. Нижнее Ершовское, в котором доля Cl^- снизилась с 40-45% до 7-9%, а Na^+ с 15-26% до 9-13%. В пресных поверхностных слоях меромиктических озёр солевой состав схож с пресноводными озёрами, однако при увеличении минерализации, ниже хемоклина, преобразуется в хлоридно-натриевый ($\text{Cl}^- > 40\%$; $\text{Na}^+ > 25\%$). Озёро Кисло-Сладкое, лагуна на Зелёном Мысу и Бухта Биофильтров имеют схожее распределение главных ионов.

В рассмотренных озёрах окрестностей полуострова Киндо продолжают усиливаться процессы отделения от моря. Результаты исследования химического состава позволяют предположить отсутствие существенных поступлений солёных вод в оз. Трёхцветное за период наблюдений. Озеро Большие Хрусломены также испытывает очень слабое влияние моря на гидрохимические процессы внутри водоёма. В озере Нижнее Ершовское отсутствуют минерализованные водные массы, а солевой состав сменился на типичный для пресных озёр. Отдельно стоит отметить озеро Кисло-Сладкое, где в результате поступления солёных вод произошло недавнее перемешивание слоёв и водные массы постепенно возвращаются в состояние, характерное для меромиктических водоёмов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова (номер ЦИТИС 121051400038-1).

Авторы благодарят за помощь в организации и проведении исследований сотрудников ББС МГУ им. Н.А. Перцова и лично директора, проф. А.Б. Цетлина, с.н.с. Е.Д. Краснову и Д.А. Воронова, а также руководителя лаборатории парниковых газов ИФА РАН В.С. Казанцева.

Литература

- [1] Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ» СПб.: ООО «Веда», 2006. 212 с.
[2] Лозовик П.А. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / П.А. Лозовик, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
[3] Алекин О.А. Основы гидрохимии. Гидрометиздат. Л., 1970, 415 с.

S u m m a r y. The meromictic lakes of the Kindo Peninsula are unique natural objects that allows to trace all the stages of separating the bay from the sea and turning it into a freshwater lake. Chemical composition of the lakes considered in the study has been studied for 10 years, since 2014. In winter 2024, the highest pH values (>7) were observed in the Buhta Biofiltrov bay and the lagoon Zeleniy Mys. In freshwater lakes, they were less than 6.5. The content of phosphorus and silicon in the bottom layers of meromictic lakes increased in comparison to the results of surveys in 2014-2015 (up to 11- 17 mg/l), and in fresh lakes, they decrease (27-79 mg/l). The predominance of organic forms of phosphorus is noted in the bottom layers of meromictic lakes. The main ion composition of the lakes has changed slightly in 10 years. Freshwater lakes belong to the bicarbonate class. The cationic composition is mixed. The bottom horizons of meromictic lakes belong to the chloride class, the sodium group. Thus, in the meromictic lakes of the Kindo Peninsula, a tendency to increase separation from the sea can be traced. At the same time, lakes that remain connected to the sea (Lake Kislo-Sladkoe, lagoon Zeleniy Mys) continue to be influenced by penetrating seawater, which is expressed in a chemical composition closer to seawater.

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗЕЛЕННЫХ СЕРНЫХ БАКТЕРИЙ В БЕЛОМОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМАХ ПО СПЕКТРАМ ПОГЛОЩЕНИЯ И ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ БАКТЕРИОХЛОРОФИЛЛА В ЭКСТРАКТАХ

А.А. Жильцова¹, Ю.Г. Соколовская¹, Е.Д. Краснова¹, Д.А. Воронов²,
С.В. Пацаева¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, aa.zhiltsova@physics.msu.ru,
sokolovskaja.julija@physics.msu.ru, e_d_krasnova@mail.ru, spatsaeva@mail.ru
²Институт проблем передачи информации РАН, г. Москва, da_voronov@mail.ru

THE ESTIMATION OF GREEN SULFUR BACTERIA DISTRIBUTION IN THE WHITE SEA COASTAL MEROMICTIC RESERVOIRS BY ABSORPTION AND FLUORESCENCE OF BACTERIOCHLOROPHYLL IN EXTRACTS

A.A. Zhiltsova¹, Y.G. Sokolovskaya¹, E.D. Krasnova¹, D.A. Voronov²,
S.V. Patsaeva¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow
² Institute for Information Transmission Problems RAS, Moscow

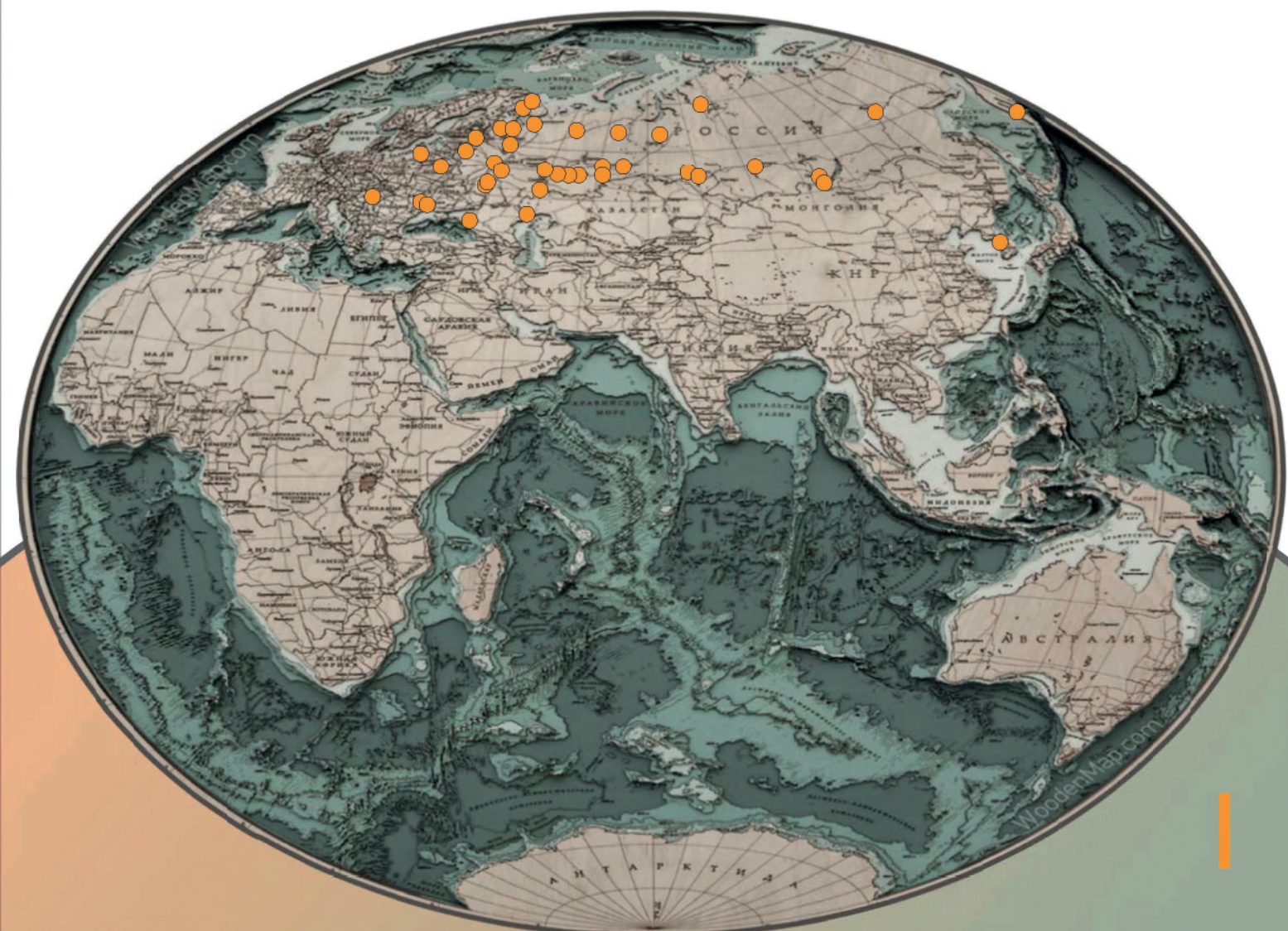
Аннотация. Проведен спектральный анализ проб природной воды с зелеными серными бактериями из меромиктического озера Трехцветное на побережье Кандалакшского залива



LXXVII 
Герценовские
Чтения

География: **Развитие науки и** **образования**

Международная
научно-практическая
конференция
22–26 апреля 2024 года



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. А. И. ГЕРЦЕНА
HERZEN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF RUSSIA

LXXVII Герценовские чтения
География:
развитие науки и образования

Материалы Международной научно-практической конференции
22–26 апреля 2024 года

В 2-х томах

I
LXXVII Herzen readings
Geography:
Development of Science and Education

Materials of the International Scientific and Practical Conference
on April 22–26, 2024

In 2 volumes

Санкт-Петербург
Издательство РГПУ им. А. И. Герцена
2024

УДК 911.5

Рецензенты:

Ал. А. Григорьев, доктор географических наук, профессор, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена

Д. В. Севастьянов, доктор географических наук, профессор, Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина

Редакционная коллегия:

Д. А. Субетто (отв. ред.), *Ю. Л. Войтеховский* (отв. ред.), *А. Н. Паранина* (отв. ред.),
А. С. Баранов, *Д. А. Гдалин*, *Ю. Н. Гладкий*, *И. М. Греков*, *С. В. Ильинский*, *В. Ф. Куликов*,
Л. А. Пестрякова, *В. Д. Сухоруков*, *М. А. Науменко*

LXXVII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования : Материалы Международной научно-практической конференции 22–26 апреля 2024 года : в 2 т. Т. I / отв. ред. Д. А. Субетто, Ю. Л. Войтеховский, А. Н. Паранина. — Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2024. — 1 электронно-оптический диск. — Текст : электронный.

LXXVI Gertsenovsky readings. Geography: development of science and education. Materials of the International Scientific and Practical Conference on April 22–26, 2024 : in 2 vol. Part I / by ed. D. A. Subetto, Yu. L. Voitekhovsky, A. N. Paranina. — St. Petersburg : Publishing house of Herzen State Pedagogical University of Russia, 2024. — 1 optical disc. — Text : electronic
ISBN 978-5-8064-3535-5

ISBN 978-5-8064-3534-8 (том 1)

Сборник «География: развитие науки и образования» отражает результаты работы научно-практической конференции 77 Герценовские чтения 22–26 апреля 2024 года, посвященной Международному дню Земли.

Материалы сгруппированы в два тома. Том I включает главы: 1. География — основа моделирования мира, 2. Современные вопросы физической географии, 3. Исследования полярных областей, 4. Лимнология и меромиктические озера, 5. Палеолимнологические и палеогеографические исследования. Том II включает главы: 1. История Наук о Земле, 2. Математические методы исследований в географии, геологии и геоэкологии, 3. Геоэкология и охрана окружающей среды, 4. Развитие географического образования, 5. Социально-экономические системы и географические аспекты глобализации, 6. Регионоведение, краеведение, туризм.

УДК 911.5

Минимальные системные требования:

Тип компьютера, процессор, частота: IBM/PC; Intel Core J3 3,3 ГГц

Оперативная память (RAM): 512 Мб

Необходимо на винчестере: 160 Мб

Дополнительные программные средства: Adobe Acrobat Reader

ISBN 978-5-8064-3535-5

ISBN 978-5-8064-3534-8 (1 том)

© РГПУ им. А. И. Герцена, 2024

© Р. В. Паранин, обложка, 2024