

# **ПЕРВЫЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ И ПЕТРОМАГНИТНЫЕ ЗАПИСИ ИЗ ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОСТОЧНОГО САЯНА: ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ РЕГИОНА В ПОЗДНЕМ ЛЕДНИКОВЬЕ И ГОЛОЦЕНЕ**

Безрукова Е. В., Крайнов М. А., Щетников А. А.

## **Аннотация**

Донные отложения озер рассматриваются как одна из наиболее информативных континентальных фаций, используемых для реконструкции изменений природной среды. Эти отложения обычно содержат детальную и непрерывную запись геологических событий, необходимых для понимания особенностей седиментогенеза и эволюции ландшафтов под влиянием климатических изменений и различных катастрофических процессов. Юго-Западное Прибайкалье (Тункинский рифт и его Восточно-Саянское горное обрамление) изобилует озерами различного генезиса и морфологии. Экспедиционные исследования последних лет позволили провести комплексное изучение отложений нескольких озер из Окинского и Тункинского районов. Результаты исследований озер Хикушка и Енгаргинское показали, что в подгорно-равнинных районах Тункинской рифтовой долины дегляциация началась ранее 14800 калиброванных лет назад, а в высокогорной зоне Восточного Саяна, несколько ранее 13800 л.н. Гранулометрические, петромагнитные, физические свойства донных отложений свидетельствуют об общей слабой гидродинамической активности в котловине оз. Хикушка на протяжении последних 13800 лет. Однако постепенное снижение доли мелкообломочных фракций от основания к кровле разреза предполагает постепенное снижение уровня воды после смены источника питания озера с ледникового на атмосферное. Аккумуляция озерных илов в озере с наступлением голоцена ~ 11700 л.н. означала быструю реакцию природной среды бассейна оз. Хикушка на глобальные изменения климата. Фиксируемые в донных отложениях водоема кратковременные эпизоды усиления активности гидродинамических процессов, имевшие место ~9000, 8200, 6500, 2000 л.н., подтверждают высокую чувствительность озерной геосистемы к изменениям климата. Характер отложений оз. Енгаргинского свидетельствует о преобладании в водоеме в раннем и среднем голоцене озерно-аллювиального режима седиментации.

Новые результаты изучения гранулометрических и петромагнитных параметров донных отложений озер Восточного Саяна показали их высокий потенциал для широкого спектра палеоэкологических реконструкций.

Озерные отложения, гранулометрия, петромагнитные записи, датированные записи природной среды, позднеледниковый период-голоцен, палеогидрология

## **Ключевые слова:**

Донные отложения, гранулометрия, физические свойства, петромагнитные записи, датированные записи природной среды, позднеледниковый период-голоцен

**НОВЫЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ И ПЕТРОМАГНИТНЫЕ ЗАПИСИ ИЗ  
ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ: ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ  
РЕКОНСТРУКЦИИ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В ПОЗДНЕМ ЛЕДНИКОВЬЕ И  
ГОЛОЦЕНЕ**

**Е.В. Безрукова<sup>1,2,3</sup>, М.А. Крайнов<sup>1</sup>, А.А. Щетников<sup>1,2,4,5,6</sup>**

*<sup>1</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН*

*664033, Иркутск, ул. Фаворского 1А, Россия, e-mail: bezrukova@igc.irk.ru*

*<sup>2</sup>Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия*

*<sup>3</sup>Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия <sup>4</sup>*

*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

*<sup>5</sup>Иркутский государственный университет, 664003, Иркутск, Карла Маркса, 1, Россия*

*<sup>6</sup>Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, Россия*

**АННОТАЦИЯ**

Донные отложения озер рассматриваются как одна из наиболее информативных континентальных фаций, используемых для реконструкции изменений природной среды. Эти отложения обычно содержат детальную и непрерывную запись геологических событий, необходимых для понимания особенностей седиментогенеза и эволюции ландшафтов под влиянием климатических изменений и различных катастрофических процессов. Юго-Западное Прибайкалье (Тункинский рифт и его Восточно-Саянское горное обрамление) изобилует озерами различного генезиса и морфологии. Экспедиционные исследования последних лет позволили провести комплексное изучение отложений нескольких озер из Окинского и Тункинского районов. Результаты исследований озер Хикушка и Енгаргинское показали, что в подгорно-равнинных районах Тункинской рифтовой долины дегляциация началась ранее 14800 калиброванных лет назад, а в высокогорной зоне Восточного Саяна, несколько ранее 13800 л.н. Гранулометрические, петромагнитные, физические свойства донных отложений свидетельствуют об общей слабой гидродинамической активности в котловине оз. Хикушка на протяжении последних 13800 лет. Однако постепенное снижение доли

мелкообломочных фракций от основания к кровле разреза предполагает постепенное снижение уровня воды после смены источника питания озера с ледникового на атмосферное. Аккумуляция озерных илов в озере с наступлением голоцена ~ 11700 л.н. означала быструю реакцию природной среды бассейна оз. Хикушка на глобальные изменения климата. Фиксируемые в донных отложениях водоема кратковременные эпизоды усиления активности гидродинамических процессов, имевшие место ~9000, 8200, 6500, 2000 л.н., подтверждают высокую чувствительность озерной геосистемы к изменениям климата. Характер отложений оз. Енгаргинского свидетельствует о преобладании в водоеме в раннем и среднем голоцене озерно-аллювиального режима седиментации.

Новые результаты изучения гранулометрических и петромагнитных параметров донных отложений озер Восточного Саяна показали их высокий потенциал для широкого спектра палеоэкологических реконструкций.

*Озерные отложения, гранулометрия, петромагнитные записи, датированные записи природной среды, позднеледниковый период-голоцен, палеогидрология*

## **NEW GRAIN-SIZE AND PETROMAGNETIC RECORDS FROM LAKE SEDIMENTS OF THE SOUTH-WESTERN CIS-BAIKAL: APPLICATION FOR RECONSTRUCTION OF REGIONAL ENVIRONMENT IN THE LATE GLACIAL AND HOLOCENE**

**E.V. Bezrukova<sup>1,2,3</sup>, M.A. Kraynov<sup>1</sup>, A.A. Shchetnikov<sup>1,2,4,5,6</sup>**

### **ABSTRACT**

Bottom sediments of lakes are considered as one of the most informative continental facies used to reconstruct environmental changes in lakes catchments. They usually contain a high-resolution and continuous records of geological events, knowledge of which is important for understanding the evolution of sedimentary processes, landscapes under the influence of climatic changes and impact of short-leaved catastrophic processes. The southwestern Baikal region (the Tunka rift and its East Sayan mountain border) is replete with lakes of various genesis and morphology. Fieldworks of recent years have allowed a multiproxy study of the lacustrine sediments of several lakes from the Oka and Tunka regions. The results demonstrate that there were no glaciers in the foothill-plain of the Tunka rift valley earlier than 14800

calibrated years ago. On the Oka Plateau, within the East Sayan high mountain zone, deglaciation started somewhat earlier than 13800 cal. BP.

Grain-size, petromagnetic, and physical properties of lacustrine sediments indicate a general weak hydrodynamics throughout 13800 years sedimentation history in Lake Khikushka. However, a gradual decrease in the fine fractions from the base to the top of the section suggests a gradual decrease in the water level following change of the water source from glacial melt waters to atmospheric precipitation.

Biogenic silt accumulation in Lake Khikushka started parallel with the onset of the Holocene ~ 11700 BP suggesting a quick response of the natural environment of the lake's basin to major global climate change. Short-term episodes of increased hydrodynamics in Lake Khikushka which occurred ~ 9000, 8200, 6500, 2000 BP confirm the high sensitivity of the lake geosystem to climate change, not only on a millennial, but also on a shorter time scale.

The sediment characteristics of the Lake Engarginskoe indicates the existence of an lacustrine-alluvial sedimentation regime in the reservoir in the Early and Middle Holocene.

New results of the grain-size, petromagnetic parameters of the lacustrine sediments from two lakes located within different climatic belts of the East Sayan Mountains show their high potential for a wide range of paleoecological reconstructions.

*Bottom sediments, granulometry, petromagnetic records, dated records of the natural environment, Late Glacial, Holocene, paleohydrology*

## ВВЕДЕНИЕ

Реакция континентальных экосистем северного полушария на климатические колебания финала последнего оледенения и в голоцене была неоднородной во времени и в пространстве и зависела от региональных климатических условий. Реконструкции ответа региональных экосистем на эти климатические колебания затруднены из-за ограниченного набора высокоразрешающих надежно датированных континентальных записей позднеледниковья и голоцена из многих регионов северного полушария. Однако результаты новых исследований из разных регионов постоянно пополняют наши знания, способствуя все более глубокому пониманию особенностей реакций наземных и озерных экосистем на глобальные климатические изменения. Это справедливо и для горных районов юга Восточной Сибири [Stepanova et al., 2019], Алтая [Blyakharchuk et al., 2004; Westover et al., 2006; Rudaya et al., 2009, 2016], Саяно-Тувинского нагорья [Панин и др., 2012].

Длительные записи изменений природной среды гор Восточного Саяна в прошлом пока единичны из-за трудной доступности этого высокогорного района. Между тем, в Восточном Саяне широко развиты процессы лимногенеза, а донные отложения озер являются ценнейшими природными архивами длительных и непрерывных изменений природной среды. Кроме того, из озер Восточного Саяна вытекают крупные реки, снабжающие водой густонаселенные районы Иркутской области, Красноярского края. Поэтому наше понимание связей между изменениями природной среды и состоянием озерных систем должно основываться не только на современных наблюдениях, но, поскольку речь идет о долгосрочных процессах, базироваться на палеоэкологических реконструкциях.

Ранее нами были получены первые результаты комплексного исследования лавово-подпрудного оз. Хара-Нур (рис.1) из высокогорной зоны хребта Восточный Саян. Эти результаты позволили впервые реконструировать историю растительности, климата и процессов выветривания в бассейне озера за последние 6880 лет [Безрукова и др., 2016]. Более длительная палеогеографическая запись получена из озера ледникового происхождения, условно названного нами ESM-1 [Maskay et al., 2012], расположенного в днище Ильчирского грабена Восточного Саяна (рис. 1). Запись ESM-1 показала, что в начале голоцена (11200–9100 лет назад или л.н.) в этом районе доминировала степная и тундровая растительность. Бореальные леса быстро расширились около 9100 л.н. В целом, анализ имеющихся результатов показал явный недостаток надежно датированных, высокоразрешающих, комплексных записей из Восточно-Саянской горной системы. Это позволяет отнести ее к тем областям, где условия позднеледниковья оказались не изученными, а голоцена - изучены слабо. Для частичного заполнения этого пробела мы провели первые комплексные исследования донных отложений двух озер из районов с разными современными физико-географическими условиями – оз. Хикушка из высокогорной зоны В. Саяна и оз. Енгаргинское из Тункинской рифтовой долины- юго-западной секции Байкальской рифтовой зоны. Целью этих исследований стала реконструкция природной среды восточной части Восточного Саяна и Тункинской рифтовой долины в позднеледниковье и голоцене, корреляция реконструированных изменения природной среды этих районов с таковыми из соседних регионов и установление возможных причин реконструированных изменений.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оз. Хикушка является каровым, проточным озером и находится в верховьях пади Хи-Гол (абс. выс. 1956 м), (см. рис. 1). Площадь водной поверхности озера составляет 0,3

км<sup>2</sup>, глубина достигает 42 м. Котловина оз. Хикушка имеет крутые скалистые склоны, основания которых покрыты коллювиальными шлейфами и курумами, спускающимися в озеро (рис. 2). Грубообломочные породы литоральной зоны вглубь водоема быстро замещаются глинистыми отложениями.

Современная растительность склонов вокруг оз. Хикушка представлена островками травянистой злаково-разнотравной тундры и пятнами кустарниковой тундры из березки кустарниковой и, в меньшей мере, ивы. Разреженный характер растительности слабо препятствует прямому поступлению в озеро терригенного материала со склонов.

Оз. Енгаргинское имеет тектонический генезис [Щетников, 2007] и является крупным озеровидным расширением русла р. Енгарга, берущей свое начало в высокогорьях Тункинских Гольцов. Оно приурочено к поясу низких аккумулятивных равнин пойменного уровня (рис. 3). Характерным элементом морфологических ландшафтов днища Тункинской впадины являются низкие озерно-болотные равнины участков интенсивных молодых тектонических погружений [Schetnikov, 2016]. Озеро – крупнейшее в предгорьях Тункинской долины, располагается на высоте 749 м над у.м., протяженность его с севера на юг около 3 км, максимальная ширина до 800 м, площадь водной поверхности около 1 км<sup>2</sup>. Озеро имеет малые глубины (до 2,2 м), характеризуется морфологически юными низкими заболоченными берегами и значительным гидрологическим влиянием на его функционирование р. Енгарга. Береговая линия озера довольно подвижна. В сезон летних, особенно селевых паводков, озеро значительно расширяет свою акваторию, в его котловину поступает особенно много терригенного материала. Котловина озера располагается в лесостепном поясе, покрывающем днище Тункинской впадины [Холбоева, 1998]. По южному берегу озера растет сосново-лиственнично-березовый лес.

Батиметрические измерения донных отложений озер проведены трехмерным 6-лучевым эхолотом Humminbird Matrix 748x3D). Бурение выполнялось гравитационным керноотборным устройством UWITEC (Австрия), снаряжающегося ПВХ трубками диаметром 63 мм. В оз. Хикушка керн отобран с глубины 32 м (52° 41' 39,0" с.ш.; 98° 58' 03,8" в.д); в оз. Енгаргинское бурение осуществлялось в точке с глубиной воды в 2 м (51° 46' 33,99" с.ш.; 102° 05' 31,71" в.д.) (рис. 1). Длина полученных кернов из озер Хикушки и Енгаргинского составила 124 и 407 см, соответственно.

Влажность, плотность сухого вещества осадка (ПО) и содержание биогенного кремнезема (SiO<sub>2биог</sub>) рассчитаны для каждого сантиметра кернов с применением стандартных методов [Коллектив..., 1995; Mortlock and Froelich, 1989; Коллектив..., 2004].

Для определения  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  предварительно высушенные при  $60^\circ\text{C}$ , растертые и взвешенные (навеска до 500 мг) пробы заливались раствором 2М  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и выдерживались, периодически перемешиваясь, в термостате в течение пяти часов при температуре  $85^\circ\text{C}$ . После этого концентрация  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  определялась на спектрофотометре с использованием цветной реакции молибдата аммония.

Для определения влажности в предварительно взвешенную пластиковую емкость отбирали  $1\text{см}^3$  осадка, взвешивали вместе с емкостью, затем высушивали в течение трех дней при температуре  $60^\circ\text{C}$  и снова взвешивали. Из полученных данных по стандартным формулам были рассчитаны значения влажности и плотности.

Для оценки возраста отложений в лаборатории радиоуглеродного анализа в г. Познань (Польша) и в лабораториях пробоподготовки и изотопного анализа ИАЭТ СО РАН, радиоуглеродных методов анализа НГУ, на УНУ «УМС ИЯФ СО РАН» [Rastigeev et al., 2018a; Rastigeev et al., 2018b] были получены  $\text{AMS}^{14}\text{C}$  датировки по общему органическому веществу (табл. 1). Измеренные значения приведены в соответствие с калиброванным возрастом с использованием калибровочной кривой INTCAL 13 [Reimer et al., 2013]. При интерпретации изменений природной среды в бассейне оз. Енгаргинское мы не используем возрастную модель из-за перерывов в озерной седиментации. Кроме того, для интервала 60–67 см от верха керна нет данных, поскольку на этот интервал приходится разрыв (по техническим причинам).

Ориентированные образцы для петромагнитных исследований отбирались с шагом 3 см в керне из оз. Хикушка и с шагом 5 см – из оз. Енгаргинского. Для измерения безгистерезисной остаточной намагниченности (ARM) образцы предварительно размагничивались переменным магнитным полем (10 мТл) в катушке, помещённой в магнитный вакуум. Далее, при той же величине переменного поля, образцы дважды намагничивались в этой катушке, помещённой в современное поле Земли - по оси z (направлена вдоль керна) и против неё. На основе полученных данных и рассчитывалась ARM, для чего использовался спин-магнитометр JR-6 (Agico, Чехия). Магнитная восприимчивость (MB) измерялась на каппометре KLY-2.

Гранулометрические исследования проводились с использованием навески массой  $\sim 0,5$  г сухого вещества. Органическое вещество выжигалось 10% раствором пероксида водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) в пробирках, помещённых в шейкер [Allen and Thornley, 2004; Свальнов и Алексеева, 2005; Mikutta et al., 2005]. После этого пробы в пробирках центрифугировались 15 минут на скорости 3000 об/мин., затем пероксид водорода удалялся, вместо него

добавлялась дистиллированная вода, и процесс повторялся. Затем образцы высушивались при температуре 105 °С.

Содержание фракции крупнее 0,3 мм определялось стандартным ситованием, фракции размером 0,3–200 мкм - на лазерном дифракционном анализаторе частиц Frish Analysette 22. Выделенные подфракции объединялись в следующие группы: <5 мкм (мелкая пелитовая); вторая - 5–10 мкм (крупная пелитовая); третья - 10–50 мкм (мелкоалевритовая), четвертая - >50 мкм (крупноалевритовая с мелкозернистым песком, в которую входили и частицы крупнее 300 мкм, полученные стандартным ситованием). Для выделения значимых изменений в измеренных параметрах донных отложений применен стратиграфически ограниченный кластерный анализ (CONISS) [Grimm, 2004].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Озеро Хикушка.** Калиброванные значения абсолютного возраста отложений показаны на рисунке 4 (далее приводятся только калиброванные значения возраста). Возрастная модель базируется на линейной интерполяции между соседними датами. Она показывает удревнение возраста верхнего слоя отложений (рис. 4).

Результаты изучения донных отложений оз. Хикушка (рис. 5) позволяют выделить пять этапов изменения измеренных показателей его донных отложений. Среднее временное разрешение записей плотности, влажности и  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  составляет 112 лет, для остальных параметров – 500 лет.

В этап 5 (123–82 см; ~ 13800–11700 л.н.) происходила аккумуляция плотных ледниковых глин с господством тонких фракций минерального зерна размерностью <5 мкм и 5–10 мкм (рис. 5). Для отложений этого этапа характерны низкие значения медианного диаметра зерен (МД) (<8,5 мкм, за исключением одного образца), биогенного кремнезёма  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  (<2% с ростом до 6% в последние столетия этапа), высокие - плотности осадка (ПО) (до 1,6 г/см<sup>3</sup>), ARM (местами свыше  $50 \cdot 10^{-4}$  А/м) и MB (до  $50 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ).

В отложениях этапа 4 (82–63 см, ~ 11700–10000 л.н.) снизилось обилие мелкой фракции <5 мкм (рис. 4) на границе с этапом 5, отмечен пик содержания крупной фракции размерностью >50 мкм и МД ок. 11700 л.н. Содержание крупной фракции размерностью >50 мкм возросло до 20%, МД - до 22 мкм в горизонте ок. 11700 л.н. Концентрация  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  значительно повысилась от 6% до 10-15%, а значения ПО, ARM и MB резко снизились по сравнению с предыдущим этапом (с 1,35-1,60 до 1,20-1,30 мкм; с  $15-50 \cdot 10^{-4}$  А/м до  $2,5-14 \cdot 10^{-4}$  А/м и с  $15-50 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ до  $10-20 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ соответственно).



Для этапа 3 (63–33 см, ~ 10000–6000 л.н.) характерно продолжающееся снижение обилия фракций 5-10 мкм и <5 мкм, ПО и небольшое повышение значений ARM. В отложениях, возраст которых составляет ~9000 и 6500 л.н., отмечены самые значительные во всей гранулометрической записи пики крупной фракции размерностью >50 мкм.

В отложениях этапа 2 (33–16 см, ~ 6000–3000 л.н.) несколько повысилось обилие фракции <5 мкм. Показатели ARM и, особенно, SiO<sub>2био</sub> повысились по сравнению с предыдущим этапом.

Этап 1 (верхние 15 см, последние 3000 лет). В отложениях повысилось обилие фракции размерностью >50 мкм и значений ARM. Значения MB осталась близкими с таковыми предыдущего этапа. Концентрации SiO<sub>2био</sub> значительно снизились.

**Озеро Енгаргинское.** Результаты изучения донных отложений оз. Енгаргинское (рис. 6) позволяют выделить пять этапов изменения показателей его донных отложений. Учитывая возраст основания керна, равным 14850 л.н., и количество изученных образцов (влажность, плотность и SiO<sub>2био</sub> измерены для каждого см керна, а остальные параметры – для каждого 5 см), среднее временное разрешение записей плотности, влажности и SiO<sub>2био</sub> составляет около 40 лет, для остальных параметров – около 200 лет.

В отложениях 5 этапа (404–232 см; начиная с 14800 л.н.) накапливались преимущественно глинистый алеврит и мелкозернистый песок, в которых преобладала крупная фракция минерального зерна размерностью >100 мкм. Здесь же отмечена высокая плотность осадка, а показатели ARM, MB достигают пиковых значений до  $200 \cdot 10^{-4}$  А/м,  $1370 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ, соответственно, в слое возрастом 12680 лет. Содержания общего органического вещества ООВ, SiO<sub>2био</sub> очень низкие.

Возраст этапа 4, когда происходила аккумуляция торфа, не установлен. Даты 5400 и 4075 л.н. определяют лишь возраст слоя торфа с высокими значениями ООВ до 67% и самыми низкими – остальных измеренных показателей.

Донные отложения этапа 3 (189–142 см) представлены биогенно-терригенными илами, насыщенными створками диатомовых водорослей. В этом слое отмечен максимум обилия фракции минерального зерна размерностью 5–10 мкм и <5 мкм. Значения ООВ понизились по сравнению с предыдущим этапом. Содержания SiO<sub>2био</sub> резко возросли от почти нулевых значений до 50%.

Отложения этапа 2 (142–71 см) представлены глинистым алевритом, в котором отмечено резкое повышение песчаной фракции, ПО, MB, ARM и снижение ООВ и SiO<sub>2био</sub> почти до нулевых значений. Возраст нижней границы этого этапа прямым датированием не определялся, а возраст его верхней границы составляет ~ 3500 л.н.

В этап 1 (71–0 см, последние ~ 3500 лет) в оз. Енгаргинское накапливались биогенно-терригенные илы, насыщенными створками диатомовых водорослей (рис. 5). В этом слое отмечено повышение обилия мелких фракций размерностью <5 мкм и в 5–10 мкм с 8 до 15% и с 15 до 28%, соответственно. Значения ООВ и SiO<sub>2</sub>био возросли по сравнению с предыдущим этапом в среднем до 70% и 40%, соответственно.

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Возрастные модели.** Неопределенности резервуарного эффекта, связанные с <sup>14</sup>C датированием образцов по общей массе, известны [Olsson, 1986; Geyh, Schotterer, Grosjean, 1998; Olsson, 2009]. Учитывая разнообразие возможных факторов, влияющих на появление резервуарного эффекта при определении возраста донных отложений озер, можно предполагать, что удревнение возраста верхнего слоя отложений могло произойти из-за: а) биотурбации приповерхностной толщи осадка; б) прямого поступления «старого» углерода из почв и растительности при сборе и транспортировке в озеро растворенного неорганического углерода; в) изменений площади поверхности озера или повышения скоростей аккумуляции, связанных, например, с изменениями природной среды. В случае оз. Хикушка следует учитывать и возможный эффект поступления в них ювенильных вод, лишенных <sup>14</sup>C. Причиной удревнения возраста верхнего слоя отложений в случае с оз. Енгаргинское может быть интенсивное современное погружение днища Тункинской долины [Shchetnikov et al., 2012], обуславливающее закономерное повышение темпов биогенного осадконакопления. При этом, погружение обуславливает интенсивное заболачивание берегов озера, развитие обильной прибрежно-водной растительности. В отличие от наземных однолетних растений, получающих углерод, как правило, из атмосферы, водные растения могут получать углерод из различных источников, а именно, из атмосферы, воды и донных осадков. Эти различные источники углерода могут отличаться друг от друга по активности <sup>14</sup>C, приводя к некоторому искажению радиоуглеродного возраста [Philippsen, Heinemeier, 2013]. Возможно, именно поэтому удревнены значения <sup>14</sup>C возраста в отложениях оз. Енгаргинское, хотя, широкое развитие в Тункинской долине позднеплейстоцен-раннеголоценовых лессовидных пород также может вносить вклад в возникновение резервуарного эффекта, поскольку растворенный в воде атмосферный CO<sub>2</sub> будет разбавлен древними карбонатами, в которых <sup>14</sup>C отсутствует [Noller et al., 2000].

Однако вопрос расчета резервуарного эффекта не является приоритетной целью настоящего исследования и поэтому более детально не рассматривается. Позднее

планируется проведение специальных исследований для расчета поправочного коэффициента на резервуарный эффект.

**Основы интерпретации данных.** Известно, что повышенные значения МВ отражают, главным образом, концентрацию в отложениях ферромагнитных минералов [Thompson et al., 1975; Hakanson, Jansson, 1983]. Она зависит от содержания магнитных минеральных частиц и тесно связана с климатом. С увеличением количества атмосферных осадков, как известно, возрастает эрозионная и транспортирующая способность водотоков, и тогда большее количество минеральных, в том числе, магнитных частиц попадает в озеро, повышая значение МВ. Следовательно, высокая МВ в условной мере может отражать высокую гидродинамическую активность водных потоков. ARM является, в основном, показателем концентрации мелких, стабильных ( $\sim 0,02\text{--}0,04$  мкм) ферромагнитных зерен [Wang et al., 2010].

Предполагается, что вариации гранулометрических фракций в озерных отложениях отражают изменения гидрологического режима и тоже могут быть использованы для реконструкции климата. Размерность минеральных зерен в донных отложениях также несет информацию об изменении интенсивности эрозии в бассейне озер, энергии воды при транспортировке вещества и колебаниях уровня воды [Parris et al., 2010; Xiao et al., 2012; Macumber et al., 2018; Ma, Abuduwaili, Liu, 2020].

Современные наблюдения показывают, что МД минерального зерна  $<10$  мкм является надежным индикатором уровня озера, поскольку он имеет наиболее значимую корреляцию с площадью озера и с количеством атмосферных осадков [Hakanson, Jansson, 1983; Wang et al., 2019]. Однако высокое значение МД и низкое мелкой фракции могут быть отнесены не только к пониженному уровню озера [Liu et al. 2003; Yin et al. 2008], но и к более динамичным ветровым условиям [Wang et al., 2019]. Глинистая фракция размерности  $<5$  мкм обычно характерна для отложений самой глубоководной части озера, и, чем выше ее содержание, тем глубже водоем в этой зоне [Hakanson and Jansson, 1983; Xiao et al., 2012]. Следовательно, вариации фракции  $<10$  мкм могут использоваться для отражения относительного изменения глубины озера. Однако такие фракции могут свидетельствовать и о длительном по времени ледовом покрове озера. Ледовый покров снижает возможность возникновения в малых озерах достаточно сильных водных течений, переносящих крупнозернистые отложения в центр водоема, создавая условия для накопления в глубоководной зоне преимущественно алеврит-пелитового материала [Asikainen, Francus, Brigham-Grette, 2007].

**Изменения природной среды в бассейне оз. Хикушка.** Господство тонких фракций размерностью <5 мкм и 5–10 мкм в самый ранний этап существования оз. Хикушка, ~13800-11700 л.н. предполагает, что на протяжении большей части года озеро было покрыто льдом. Сравнение времени существования начального этапа онтогенеза оз. Хикушка с глобальной шкалой событийной стратиграфии (рис. 5, шкала NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$ ) показывает, что этот этап соотносится с финалом потепления климата северного полушария в гренландский интерстадиал 1 (GI-1) и последующим похолоданием в гренландский стадиал 1 (GS-1) [Rasmussen et al., 2014]. Повышенный уровень летней (рис. 5) инсоляции [Berger, Loutre, 1991] стал причиной активного таяния локального ледника и образования озера в непосредственной близости от его края.

Низкое содержание  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  (рис. 5) предполагает, что вода была мутной и очень холодной, а сама озерная система - низкопродуктивной. Высокие значения MB могут служить подтверждением обильного поступления минеральной составляющей. Значительная изменчивость шкалы ARM в начальный этап развития оз. Хикушка, возможно, отражает частые кратковременные изменения климата его бассейна в ответ на события позднеледникового [Rasmussen et al., 2014]. Однако, высокие значения MB и ARM могут быть и результатом вулканической деятельности в регионе на границе плейстоцена и голоцена. Так, тефрохронологические исследования для оз. Каскадное-1, лежащего в нескольких километрах к западу от оз. Хикушка, показали, что наиболее активная фаза вулканической активности имела место около 14300-13300 л.н. [Shchetnikov, Bezrukova, Krivonogov, 2019]. Менее активно извержения происходили 13300-6300 л.н. Эти две фазы вулканизма разделены периодом вулканического покоя длительностью почти пять тысяч лет от 6300 до 1600 л.н. Время аккумуляции отложений этапа 5 в оз. Хикушка совпадает с первой фазой региональной вулканической активности (14300-6300 л.н.), что может свидетельствовать в пользу гипотезы присутствия в отложениях 5-го этапа развития озера мелких зерен магнитных минералов в т.ч. и вулканического генезиса, вероятно поступивших в водоем в составе микротефры.

С наступлением голоцена, ~ 11700 л.н., в оз. Хикушка произошла смена типа осадконакопления – стали накапливаться биогенно-терригенные илы, (рис. 4, этап 4). Вероятно, к этому времени локальный ледник растаял, и источниками питания озера стали талые снежные воды и летние дожди. Изменение режима питания привело к понижению уровня воды в озере. Снижение значений MB предполагает ослабление эрозии склонов, что могло быть результатом развития на склонах озерной котловины относительно плотного почвенно-растительного покрова, подавлявшего эрозионные процессы и снос в

озеро терригенного материала. С другой стороны, вклад в снижение значений МВ мог внести процесс разбавления осадка диамагнитным  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ . Однако значения  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  в этом интервале не превышают 10%, поэтому, разбавляющий эффект кремнезема в это время вряд ли мог быть основной причиной снижения МВ более, чем в два раза. В целом же, природные условия четвертого этапа были благоприятны для формирования продуктивной озерной системы, развитию в ней диатомовых водорослей. Пик содержания фракции размерностью  $>50$  мкм и МД 11700 л.н. означал усиление транспортной энергии поступающих в него потоков. Этот пик, вероятно, следует связывать с коротким эпизодом повышения количества атмосферных осадков, приведшем к усилению эрозионных процессов на крутых склонах котловины оз. Хикушка. Снижение в это время значений МВ и ARM не противоречит такой интерпретации, если в привносимых более крупных частицах было низкое содержание магнитных минералов.

В это же время произошло снижение продуктивности экосистемы озера (минимум  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ ). Хотя, последующее быстрое и значительное повышение  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  означает общий сдвиг в природно-климатической обстановке системы оз. Хикушка от низко продуктивной к гораздо более продуктивной в интервале времени  $\sim 11700\text{--}10000$  л.н. Наступление благоприятных условий для развития экосистемы оз. Хикушка в этап 4 согласуется с общим потеплением климата северного полушария (рис. 4, NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$ ), наступлением более теплых летних сезонов из-за орбитально-обусловленного повышения летней инсоляции (рис. 4). Активный летний восточно-азиатский муссон (рис. 4, Dongge  $\delta^{18}\text{O}$ ) мог способствовать увеличению общего увлажнения. Существование продуктивной системы в оз. Хикушка  $\sim 11700\text{--}10000$  л.н. совпадает с первым пост-ледниковым повышением уровня воды в оз. Котокель 11500–10000 л.н. [Bezrukova et al., 2010], экспансией лесной растительности  $\sim 11200$  л.н. в водосборном бассейне оз. ESML-1 [Mackay et al., 2012], относительно теплым и влажным климатом гор Алтая с годовыми температурами на 5 градусов выше современных [Blyakharchuk et al., 2007], увеличением водности рек в Саяно-Тувинском нагорье [Панин и др., 2012].

В начале этапа 3,  $\sim 10000$  л.н., снижение концентраций  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  предполагает формирование менее продуктивной системы оз. Хикушка. Позднее 8300 л.н. водная система озера становится более продуктивной. Продолжающееся на протяжении этапа 3 незначительное снижение содержания пелитовой фракции может означать усиление гидродинамики. При этом уровень воды в озере заметно не изменялся, и массового сноса минерального вещества в точку бурения не происходило, о чем свидетельствуют почти не меняющиеся значения МВ, ARM.

Однако ~ 9000 и 6500 л.н. имели место короткие события увеличения объемов поступления минерального вещества в озеро. Вероятно, как и в начале этапа 4, это было связано с эпизодами возрастания роли ливневых атмосферных осадков.

Этап 3 в развитии оз. Хикушка соответствует времени максимальной активности влажного азиатского циклона и продолжающегося роста температур воздуха в северо-атлантическом регионе (изотопные и инсоляционная шкалы на рис. 4). Количественные реконструкции палеоклимата и ландшафтов, базирующиеся на надежно датированных пыльцевых, диатомовых и иных записях из оз. Байкал [Tarasov et al., 2007], оз. Котокель [Tarasov et al., 2009], оз. ESM-1 [Maskay et al., 2012], показывают, что в последние 15 тысяч лет самый влажный климат был характерен для интервала ~ 10000/9000–7000/6500 л.н. Повышение общего увлажнения приводило к выпадению обильных зимних осадков и продвижению ледников в интервале 10000–7000 л.н. в юго-восточной части Алтая [Agatova et al., 2012].

В этап 2, позднее ~ 6000 л.н., несколько снижалась гидродинамическая активность в озеро, что видно из повышенного содержания тонких фракций, снижения значений МД, плотности и МВ. Это обеспечило благоприятные условия для развития диатомовой флоры в оз. Хикушка, продуцировавшей  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  (рис. 4). Причем, почти двукратное повышение в этап 2 значений  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  и не меняющиеся, низкие значения МВ не позволяют предполагать процесс разбавления осадка диамагнитным  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ .

Этап 2 соответствует ослаблению влажного азиатского муссона, постепенному снижению температуры воздуха в северном полушарии (изотопные и инсоляционная шкалы на рис. 4). Похолодание климата северного полушария могло приводить к ухудшению климата в высокогорных условиях Восточного Саяна, удлинению времени существования ледового покрова воды на оз. Хикушка и усилению аутигенного процесса в седиментогенезе. Этап 2 соотносится с завершением оптимума голоцена в Байкальском [Tarasov et al., 2007], Алтае-Саянском [Wang, Feng, 2013] регионах, снижением летних температур ~ 6000-4000 л.н. в южной части Алтайских гор [Wu et al., 2020].

Значительное повышение значений ARM при почти неизменной МВ в самый поздний этап, свидетельствует о более обильном, чем ранее, накоплении в донных отложениях озера мелких зерен магнитных минералов. Возможно, что такое поведение МВ и ARM связано с незавершенным процессом растворения магнитных зерен. Верхняя граница растворения зерен магнетита в озерных осадках редко превышает 20 см, поэтому выше нее большинство мелких зерен магнитных минералов сохраняется [Казанский и др., 2007].

Повышение значений МД в отложениях моложе ~ 3000 лет указывает на повышенную энергию переноса терригенного вещества в оз. Хикушка. Снижение концентраций  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  свидетельствует о формировании менее продуктивной, чем ранее, озерной системы. Этап 1 в развитии оз. Хикушка соответствует позднему голоцену, для которого в северном полушарии реконструировано резкое ослабление азиатского муссона, постепенное снижение температуры воздуха в северном полушарии (рис. 4, изотопные и инсоляционная шкалы). В котловине оз. Хикушка в это время могли усилиться эрозионные процессы синхронно с активизацией эрозии в этот этап и в бассейне оз. Хара-Нур [Безрукова и др., 2016]. Смоделированное повышение притока пресной воды в оз. Байкал [Bush, 2005], повышение уровня воды в оз. Тельмень [Peck et al., 2002] также приходится на это время, означая повышение уровня атмосферных осадков в позднем голоцене на большой территории Северной Азии, что связывается с усилением термогалинной циркуляции в северной части Атлантического океана [Bond et al., 2001].

В целом, следует отметить, что постепенно снижающаяся доля глинистой фракции размерностью <5 мкм в донных отложениях оз. Хикушка (рис. 4) на протяжении всего времени существования озера может свидетельствовать о постепенном понижении уровня воды в озере после таяния локального ледника и смены источника питания с ледникового на атмосферное. Однако снижение доли этой фракции может быть следствием постепенного сокращения длительности ледового покрова на озере, то есть, постепенного повышения теплообеспеченности от позднего ледниковья к настоящему времени.

**Результаты комплексного изучения донных отложений оз. Енгаргинское** позволили реконструировать пять этапов изменения гидродинамических условий в самом озере и природной среды в его бассейне за последние 14800 лет (рис. 5).

В отложениях 5 этапа (404–232 см; начиная с 14800 л.н.) господствуют крупные фракции, в том числе, песчаная, что свидетельствует о периоде повышенной энергии переноса минерального вещества в относительно мелком водоеме. Высокие значения МВ и ARM характеризуют обильное поступление в озеро тонких магнитных минералов. Многократность эпизодов поступления крупной фракции предполагает частую смену гидродинамического режима водоема из-за вариаций общего увлажнения региона в позднеледниковое время – раннем голоцене.

Высокое обилие мелких зерен магнитных минералов могло быть результатом вулканической деятельности [Shchetnikov, Bezrukova, Krivonogov, 2019]. Время аккумуляции отложений этапа 5 в оз. Енгаргинское, ограниченное нижней датой 14800 л.н. и верхней – 5400 л.н., в общем, совпадает с первыми двумя фазами региональной

вулканической активности (14300-6300 л.н.). Кроме того, в самой Тункинской впадине, в 30 км к востоку от озера, расположена группа молодых вулканов, последние извержения которых происходили на рубеже голоцена и плейстоцена. Петромагнитные исследования отложений опорных разрезов верхнего квартера впадины позволили диагностировать наличие тефросодержащих горизонтов в субаэральных толщах [Казанский и др., 2016]. Все это может свидетельствовать в пользу гипотезы присутствия в отложениях 5-го этапа развития Енгаргинского озера мелких зерен магнитных минералов в т.ч. и вулканического генезиса, вероятно поступивших в водоем в составе микротефры.

В любом случае, гидродинамические условия этапа 5, которые могли быть осложнены геохимическими процессами, связанными с вулканизмом, препятствовали поступлению и аккумуляции органического вещества в оз. Енгаргинское, развитию альгофлоры.

Как было указано выше, возраст торфяной толщи, сформированной в 4 этап, не установлен. Мы предлагаем два сценария появления торфяника в разрезе. Первый предполагает его автохтонное происхождение, возможно, из-за катастрофического обмеления водоема или вследствие крупного тектонического события, приведшего к отступлению берега водоема от точки бурения. Но в доступной литературе мы не нашли доказательств существования такого события. Второй сценарий предполагает перемещение слоя торфа в результате денудации торфяника, находившегося в области сноса. При затоплении берегов озера мог сформироваться торфяный плавучий остров, который в какой-то момент затонул в месте проведения буровых работ. Известно также, что процесс миграции русел меандрирующих рек часто сопровождается размывом низинных торфяников [Троценко, 2011]. Мы склоняемся ко второму сценарию из-за наличия резких литологических границ, а также снижения доли песчаной фракции в предшествующем интервале (260-232 см), что означало подъем уровня воды из-за повышения уровня атмосферного увлажнения. Это и могло привести к усилению денудации и размыву береговых торфяников. Дата 4070 л.н. позволяет предполагать, что размыв торфа мог произойти примерно в это время.

Если это так, то увеличение водности реки ~ 4070 л.н. выглядит вполне вероятным, поскольку это время соотносится с наступлением частых событий холодных и снежных зимних сезонов неогляциального периода, и существует множество палеоклиматических свидетельств, указывающих на то, что для периода ~4400–4000 л.н. отмечено похолодание и повышение увлажнения в северной Атлантике [Le Roy et al., 2017; Persoiu, Ionita, Weiss, 2019], продвижение ледников в горах юго-восточного Алтая ~4900–4200 л.н. [Agatova et



al., 2012], неогляциальный рост Гренландского ледникового щита [Briner et al., 2016]. В горах Восточного Саяна накопление снега могло вызывать сильные весенние паводки, приводившие к увеличению водности рек и размыву низинных торфяников.

В этап 3 (189–142 см) максимальное содержание тонкой фракции, низкие значения МД, первый максимум  $\text{SiO}_{2\text{био}}$  предполагают смену типа осадконакопления, повышение уровня воды и формирование озерных биогенно-терригенных илов и развитие продуктивной водной системы (рис. 5). Снижение значений МВ/ARM подтверждает поднятие уровня воды в озере, поскольку указывает на попадание наиболее мелких магнитных частиц в удаленные от берега отложения. Хотя, развитие кремнепанцирных организмов, продуцировавших диамагнитный  $\text{SiO}_{2\text{био}}$ , также могло повлиять на снижение МВ через процесс разбавления осадка.

Этап 2 (142–71 см) характеризуется аккумуляцией глинистого алеврита с прослоями мелкого песка с высокими значениями МВ, ARM, характеризующими обильное поступление мелких магнитных минералов. Вероятно, уровень воды в оз. Енгаргинское стал ниже, чем в предыдущий этап. Прослой мелкого песка могли накапливаться в периоды сезонных паводков. Повышение значений МВ/ARM косвенно подтверждает снижение уровня воды в озере. Возраст нижней границы этого этапа прямым датированием не определялся, а возраст его верхней границы может быть ~ 3400 л.н. (рис. 5).

В 1 этап (71–0 см, последние 3500 лет) оз. Енгаргинское представляло продуктивную озерную систему, в которой формировались биогенные илы (рис. 5). Низкие значения МВ, ARM свидетельствуют о незначительном привносе в озеро минерального вещества из-за отсутствия значительных паводков. Снижение значений МВ/ARM также указывает на поднятие уровня воды в озере, на поступление мелких зерен магнитных минералов в удаленные от берега отложения. Хотя, вероятно, что снижение МВ, ARM могло быть также следствием разбавления минерального осадка биогенным кремнеземом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ донных отложений оз. Хикушка и оз. Енгаргинское позволил впервые для исследуемого региона охарактеризовать динамику гидрологического режима и особенности седиментации и реконструировать изменения природной среды в позднем ледниковье и голоцене. Результаты показали, что дегляциация в подгорно-равнинных районах Тункинской долины и в высокогорной зоне Восточного Саяна, начавшаяся ~14800

л.н. и ~ 13800 л.н., соответственно, была обусловлена повышением уровня летней инсоляции и температуры воздуха северного полушария в GI-1.

Высокое временное разрешение и надежная возрастная модель записей из оз. Хикушка позволяет сравнивать их с ключевыми палеоклиматическими архивами из северо-атлантического и северо-тихоокеанского регионов. Соответствие между записями из оз. Хикушка и высокоразрешающими изотопными записями из этих отдаленных регионов подразумевает, что горные районы юга Восточной Сибири, несмотря на положение в глубине евразийского континента, быстро отвечали на глобальные изменения природной среды.

Начало аккумуляции озерных илов в оз. Хикушка ~ 11700 л.н. соответствует наступлению межледниковых условий голоцена, означая, что локальный ледник к этому времени растаял. Доминирование в отложениях оз. Хикушка глинистой и иловой фракций указывает на сравнительно невысокую активность гидродинамического режима на протяжении всего процесса седиментации, предполагая его непрерывное функционирование в качестве глубоководного водоема. Постепенное снижение мелких фракций от основания к кровле разреза свидетельствует о постепенном снижении уровня воды в озере. Коротковременные эпизоды привноса в озеро крупной фракции ок. 9000, 8200, 6500, 2000 л.н., скорее всего, соответствуют коротким событиям ливневых атмосферных осадков, отражая высокую чувствительность озерной геосистемы к изменениям климата не только в тысячелетнем, но и в более коротком временном масштабе. Изменения значений MB и ARM в донных отложениях озер могут быть зависимы от региональной вулканической активности, а также характеризовать вариации относительной продуктивности водоемов, резко снижаясь в результате разбавления биогенным кремнеземом содержания в осадках магнитных минералов.

Характер отложений оз. Енгаргинского свидетельствует о доминировании в водоеме в позднеледниковье, раннем и среднем голоцене озерно-аллювиального режима седиментации.

Первые результаты изучения гранулометрических, петромагнитных параметров донных отложений озер Восточного Саяна показали их высокий потенциал для дальнейшей работы с кернами из озер этого региона. Планируемое временное разрешение подобных записей улучшит наше понимание взаимодействия системы климат-гидрологический режим озер и предоставит ценнейшую научную информацию для рационального использования водных ресурсов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Проведенные исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 19-05-00328, 20-05-00247), Интеграционным проектом СО РАН (0341-2017-0001), РФФ (грант 19-17-00216, геоморфология) и выполнены в соответствии с государственным заданием Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (проект № 0350-2019-0004). Авторы благодарят О.В. Левину за анализ физических свойств осадков и концентрации биогенного кремнезема; Е.В. Кербера за помощь в расчете возрастной модели оз. Хикушка; И.А. Филинова, Е.В. Иванова за участие в полевых исследованиях.

## ЛИТЕРАТУРА

Безрукова Е.В., Щетников А.А., Кузьмин М.И., Шарова О.Г., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Иванов Е.В., Крайнов М.А., Кербер Е.В., Филинов И.А., Левина О.В. Первые данные об изменении природной среды и климата Жомболокского вулканического района (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене // Доклады Академии Наук, 2016, т. 468, №3, с. 323–327.

Казанский А.Ю., Безрукова Е.В., Кривоногов С.К., Молодин В.И., Матасова Г.Г., Чемякина М.А., Абзаева А.А., Летунова П.П., Кулагина Н.В. Реконструкция среды обитания древнего человека для комплекса археологических памятников у озера Большая Ложка // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий: Материалы Годовой сессии Института археологии и этнографии СО РАН 2007 г. (Ответственные редакторы: академик А.П. Деревянко, академик В.И. Молодин), Новосибирск, Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2007, Т. XIII, С. 249-254.

Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Щетников А.А., Филинов И.А., Чегис В.В. Диагностика вулканических событий в четвертичных отложениях Байкальской рифтовой зоны по петромагнитным данным // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту), 2016, вып. 14, с. 103-105.

Коллектив исполнителей Байкальского бурового проекта. Результаты бурения первой скважины на озере Байкал в районе Бугульдейской перемычки // Геология и геофизика, 1995, т. 36, №2, с. 3–32.

Коллектив участников проекта “Байкал-бурение”. Высокоразрешающая осадочная запись по керну глубоководного бурения на Посольской банке в оз. Байкал (BDP-99) // Геология и геофизика, 2004, т. 45, №2, с. 163–193.

Панин А.В., Бронникова М.А., Успенская О.Н., Аржанцева И.А., Константинов Е.А., Кошурников А.В., Селезнева Е.В., Фузеина Ю.Н., Шеремецкая Е.Д. История озера Тере-Холь и голоценовая динамика природной среды на юго-востоке Саяно-Тувинского нагорья // Доклады Академии наук, 2012, т. 446, №5, с. 568–574.

Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана. Москва, Изд-во Наука, 2005, 297 с.

Трощенко В.В. О механизме накопления первичного материала ископаемых гумусовых углей и угленосных формаций // Вестник Адыгейского государственного

университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки, 2011, т. 2, с. 77–90.

Холбоева С.А. Особенности флоры и типологическое разнообразие луговых степей Тункинской котловины // Исследования флоры и растительности Забайкалья: Матер. регион. науч. конф. Улан-Удэ, Изд-во БГУ, 1998, с. 67-68.

Щетников А.А. Проблемы морфотектогенеза озерных котловин (на примере Байкальской рифтовой зоны) // Тихоокеанская геология, 2007, т. 26, №2, с. 18–29.

Agatova A.R., Nazarov A.N., Nepov R.K., Rodnight H. Holocene glacier fluctuations and climate changes in the southeastern part of the Russian Altai (South Siberia) based on a radiocarbon chronology // Quaternary Science Reviews, 2012, vol. 43, p. 74–93.

Allen J.R.L., Thornley D.M. Laser granulometry of Holocene estuarine silts: effects of hydrogen peroxide treatment // The Holocene, 2004, vol. 14, p. 290–295.

Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Science Reviews, 1991, vol. 10, p. 297–317.

Bezrukova E.V., Tarasov P.E., Solovieva N., Krivonogov S.K., Riedel F. Last glacial-interglacial vegetation and environmental dynamics in southern Siberia: chronology, forcing and feedbacks // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, vol. 296, p. 185–198.

Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S., van der Knaap W. O., Ammann B. Late Glacial and Holocene vegetational changes on the Ulagan high-mountain plateau, Altai Mountains, southern Siberia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, vol. 209, p. 259–279.

Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S., van der Knaap W.O., Ammann B. Late Glacial and Holocene vegetational history of the Altai Mountains (southwestern Tuva Republic, Siberia) // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, vol. 245, is. 3-4, p. 518–534.

Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene // Science, 2001, vol. 294 (5549), p. 2130–2136.

Briner J. P., McKay N. P., Axford Y., Bennike O., Bradley R.S., de Vernal A., Fisher D., Francus P., Fréchet B., Gajewski K., Jennings A., Kaufman D.S., Millerl G., Rouston C., Wagner B. Holocene climate change in Arctic Canada and Greenland // Quaternary Science Reviews, 2016, vol. 147, p. 340–364.

Bush A.B.G. CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O and orbitally driven climate variability over central Asia through the Holocene // Quaternary International, 2005, vol. 136, p. 15–23.

Geyh M.A., Schotterer U., Grosjean M. Temporal changes of the 14C reservoir effect in lakes // Radiocarbon, 1998, vol. 40, N 2, p. 921-931.

Grimm E.C. TGView. 2004. Illinois State Museum, Research and Collections Center, Springfield.

Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Springer-Verlag, Berlin, 1983, 242 p.

Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. 2008. Hole-filled SRTM for the globe 766 Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database 767 (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

Le Roy M., Deline Ph., Carcaillet J., Schimmelpfennig I., Ermini M., ASTER Team. <sup>10</sup>Be exposure dating of the timing of Neoglacial glacier advances in the Ecrins-Pelvoux massif, southern French Alps // *Quaternary Science Reviews*, 2017, vol. 178, p. 118–138.

Liu X.Q., Wang S.M., Shen J. The grainsize of the core QH-2000 in Qinghai Lake and its implication for paleoclimate and paleoenvironment // *Journal of Lake Sciences*, 2003, vol. 15(2), p. 112–117.

Ma L., Abuduwaili J., Liu W. Environmentally sensitive grain-size component records and its response to climatic and anthropogenic influences in Bosten Lake region, China // *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, p. 942–951.

Mackay A.W., Bezrukova E.V. Leng M.J., M.Meaney, A. Nunes, N. Piotrowska, A. Self, E.Shilland, P. Tarasov, .L. Wang, D. White. Aquatic ecosystem responses to Holocene climate change and biome development in boreal, central Asia // *Quaternary Science Reviews*, 2012, vol. 41, p. 119–131.

Macumber A.L., Patterson R.T., Galloway J.M., Falck H., Swindles G. T. Reconstruction of Holocene hydroclimatic variability in subarctic treeline lakes using lake sediment grain-size end-members // *Holocene*, 2018, vol. 28, p. 845–857.

Mikutta R., Kleber M., Kaiser K. Jahn R. Review: organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate // *Soil Science Society of America Journal*, 2005, vol. 69, p. 120–135.

Mortlock R. A., Froelich Ph. N. A simple method for rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments // *Deep-Sea Research*, 1989, v. 36, № 9, p. 1415–1426.

Noller J.S., Sowers J.M., Lettis W.R. (eds). *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*. AGU Reference Shelf 4, 2000, 582 p. Olsson I.U. A study of errors in <sup>14</sup>C dates of peat and sediment // *Radiocarbon*, 1986, vol. 28(2A), p. 429–435.

Olsson I.U. Radiocarbon dating history: early days, questions, and problems met // *Radiocarbon*, 2009, vol. 51, N1, p. 1–43.

Parris A.S., Bierman P.R., Noren A.J., Prins M.A., Lini A. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States // *Journal of Paleolimnology*, 2010, vol. 43, p. 29–49.

Peck J.A., Khosbayar P., Fowell S.J., Pearce R.B., Ariunbileg S., Hansen B.C.S., Soninkhishig N. Mid to Late Holocene climate change in north central Mongolia as recorded in the sediments of Lake Telmen // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, vol. 183, p. 135–153.

Persoiu A., Ionita M., Weiss H. Atmospheric blocking induced by the strengthened Siberian High led to drying in west Asia during the 4.2 ka BP event – a hypothesis // *Climate of the Past*, 2019, vol. 15, p. 781–793.

Philippsen B., Heinemeier J. Freshwater reservoir effect variability in northern Germany // *Radiocarbon*, 2013, vol. 55(2–3), p. 1085–1101.

Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek W.Z., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J., Wheatley J.J., Winstrup M. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core

records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy // *Quaternary Science Reviews*, 2014, vol. 106, p. 14–28.

Rastigeev S. A., Parkhomchuk V.V., Klyuev V.F. An Electrostatic Tandem Accelerator for an Accelerator Mass Spectrometer // *Instruments and Experimental Techniques*, 2018a, vol. 61, Is. 1, p. 79–84.

Rastigeev S., Konstantinov E., Parkhomchuk V., Petrozhitsky A., Frolov A., Goncharov A., Klyuev V. Operation experience of the BINP Accelerator Mass Spectrometer // *AIP Conference Proceedings*, 2018b, vol. 2052, 030005.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk R.C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP // *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, N 4, p. 1869–1887.

Rudaya N., Tarasov P., Dorofeyuk N., Solovieva N., Kalugin I., Andreev A., Daryin A., Diekmann B., Riedel F., Tserendash N., Wagner M. Holocene environments and climate in the Mongolian Altai reconstructed from the Hoton-Nur pollen and diatom records: a step towards better understanding climate dynamics in Central Asia // *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28 (5–6), p. 540–554.

Rudaya N., Nazarova L., Novenko E., Andreev A., Kalugin I., Daryin A., Babich V., Li Hong-Chun, Shilov P. Quantitative reconstructions of mid- to late Holocene climate and vegetation in the north-eastern Altai mountains recorded in lake Teletskoye // *Global and Planetary Change*, 2016, vol. 141, p. 12–24.

Shchetnikov A.A., White D., Filinov I.A., Rutter N. Late Quaternary geology of the Tunka rift basin (Lake Baikal region), Russia // *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, vol. 46, p. 195–208.

Shchetnikov A.A. Morphotectonics of the Tunka rift and its bordering mountains in the Baikal rift system, Russia // *Geomorphology*, 2016, Vol. 273, p. 258–268.

Shchetnikov A.A., Bezrukova E., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 173, p. 291–303.

Stepanova O.G., Trunova V.A., Osipov E.Yu., Kononov E.E., Vorobyeva S.S., Parkhomchuk E.V., Kalinkin P.N., Vorobyeva E.E., Vershinin K.E., Rastigeev S.A., Fedotov A.P. Glacier dynamics in the southern part of East Siberia (Russia) from the final part of the LGM to the present based on from biogeochemical proxies from bottom sediments of proglacial lakes // *Quaternary International*, 2019, vol. 524, p. 4–12.

Svensson A., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Davies S.M., Johnsen S.J., Muscheler R., Parrenin F., Rasmussen S.O., Röthlisberger R., Seierstad I., Steffensen J. P., and Vinther B. M. A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology // *Climate of the Past*, 2008, vol. 4, p. 47–57.

Tarasov P., Bezrukova E., Karabanov E., Nakagawa T., Wagner M., Kulagina N., Letunova P., Abzaeva A., Granoszewski W., Riedel F. Vegetation and climate dynamics during the Holocene and Eemian interglacials derived from Lake Baikal pollen records // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, vol. 252, p. 440–457.

Tarasov P.E., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial and Holocene changes in vegetation cover and climate in southern Siberia derived from a 15 kyr long pollen record from Lake Kotokel // *Climate of the Past*, 2009, vol. 5, p. 285–295.

Thompson R., Battarbee R.W., O’Sullivan P.E., Oldfield F. Magnetic susceptibility of lake sediments // *Limnology and Oceanography*, 1975, vol. 20, p. 687–698.

Wang H., Liu H., Zhu J., Yin Y. Holocene environmental changes as recorded by mineral magnetism of sediments from Anguli-nuur Lake, southeastern Inner Mongolia Plateau, China // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, vol. 285, p. 30–49.

Wang W., Feng Z. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: A synthesis of climatic records // *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 122, p. 38–57.

Wang C., Wang H., Song G., Zheng M. Grain size of surface sediments in Selin Co (central Tibet) linked to water depth and offshore distance // *Journal of Paleolimnology*, 2019, vol. 61, p. 217–229.

Westover K.S., Fritz S.C., Blyakharchuk T.A., Wright H.E. Diatom paleolimnological record of Holocene climatic and environmental change in the Altai mountains, Siberia // *Journal of Paleolimnology*, 2006, vol. 35, p. 519–541.

Wu D., Cao J., Jia G., Guo H., Shi F., Zhang X., Rao Zh. Peat brGDGTs-based Holocene temperature history of the Altai Mountains in arid Central Asia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 538, 109464.

Xiao J., Chang Z., Fan J., Zhou L., Zhai D., Wen R., Qin X. The link between grain-size components and depositional processes in a modern clastic lake // *Sedimentology*, 2012, vol. 59, p. 1050–1062.

Yuan D.X., Cheng H., Edwards R.L., Dykoski C.A., Kelly M.J., Zhang M.L., Qing J.M., Lin Y.S., Wang Y.J., Wu J.Y., Dorale J.A., An Z.S., Cai Y.J. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian monsoon // *Science*, 2004, vol. 304, p. 575–578.

## Подписи к рисункам

**Рис.1.** Обзорная карта, показывающая положение Восточного Саяна и обсуждаемых в статье озер (А). Батиметрическая схема оз. Хикушка (Б) и батиметрическая схема оз. Енгаргинское (В). Точки бурения обозначены красными звездочками. Значения абсолютных высот базируются на данных Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) v4. с разрешением 90 м (Jarvis et al., 2008).

**Рис.2.** Общий вид котловины оз. Хикушка (фото А.А. Щетникова). На заднем плане – конусы вулканов в пади Хи-Гол.

**Рис.3.** Вид на южный, покрытый лесом берег оз. Енгаргинское (фото А.А. Щетникова).

**Рис.4.** Изменение возраста отложений в керне из оз. Хикушка с глубиной. Возраст отложений каждого сантиметра в керне определялся методом интерполяции между двумя соседними датами с допущением равномерной средней скорости седиментации между ними.

**Рис.5.** Обобщающий график избранных записей из донных отложений оз. Хикушка в сравнении с записями климата северного полушария: средние расчетные значения летней инсоляции на 55° с.ш. (Berger, Loutre, 1991); запись NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$  из ледовых кернов Гренландии как показатель температуры воздуха в северном полушарии (Svensson et al., 2008); запись Dongge Cave  $\delta^{18}\text{O}$  из китайских сталагмитов как показатель интенсивности тихоокеанского летнего муссона (Yuan et al., 2004). 1 – биогенный ил с диатомовыми; 2. – алевритистая глина.

**Рис. 6.** Обобщающий график избранных записей из донных отложений оз. Енгаргинское. 1 – биогенный ил с диатомовыми; 2 – глинистый алеврит; 3 – мелкозернистый песок; 4 – торф. 5 – мелкозернистый песок с растительными остатками; 6 – положение датированных уровней; 7 – калиброванные значения возраста.



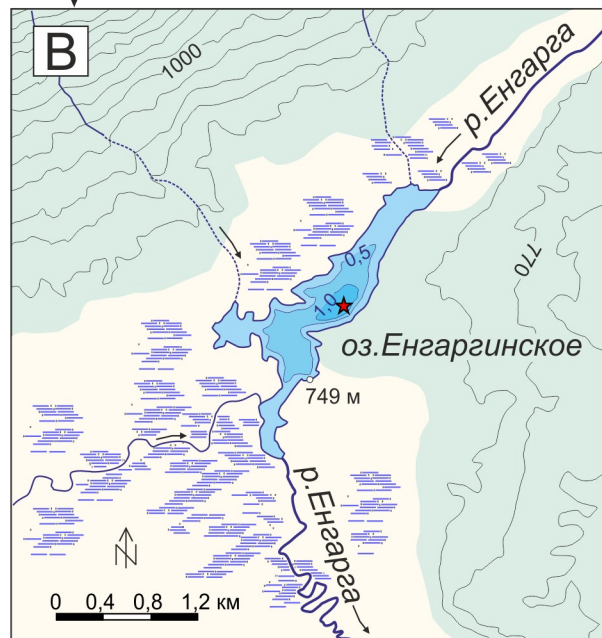
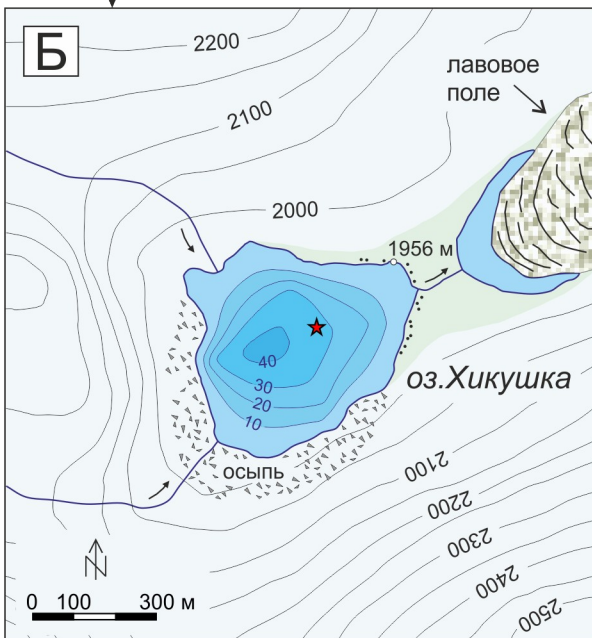
Таблица 1. Результаты радиоуглеродного датирования донных отложений озер Хикушка и Енгаргинское.

Глубина образца в керне, см	<sup>14</sup> C возраст, годы	Калиброванное средневзвешенное значение возраста /кал.годы до н.э. (2σ диапазон)	Лабораторный №.	Материал
оз. Хикушка				
4	1200±30	1127 ±48	Poz-106376*	ООУ***
15	2555±30	2667 ±81	Poz-106377	-
44	7440±40	8266 ±49	Poz-106388	-
98	10610±50	12593 ±61	Poz-106552	-
114	11560±60	13391±60	Poz-106553	-
оз. Енгаргинское				
11	1715±30	1626±44	Poz-106395	-
64	3170±30	3398±33	Poz-106398	-
190	3716 ±71	4075±102	BINP_NSU_1414**	-
222	4672 ±82	4075±102	BINP_NSU_1417	-
405	12560±60	14855±178	Poz-106340	-

\*Poz-106376 – Познаньская радиоуглеродная лаборатория, Польша

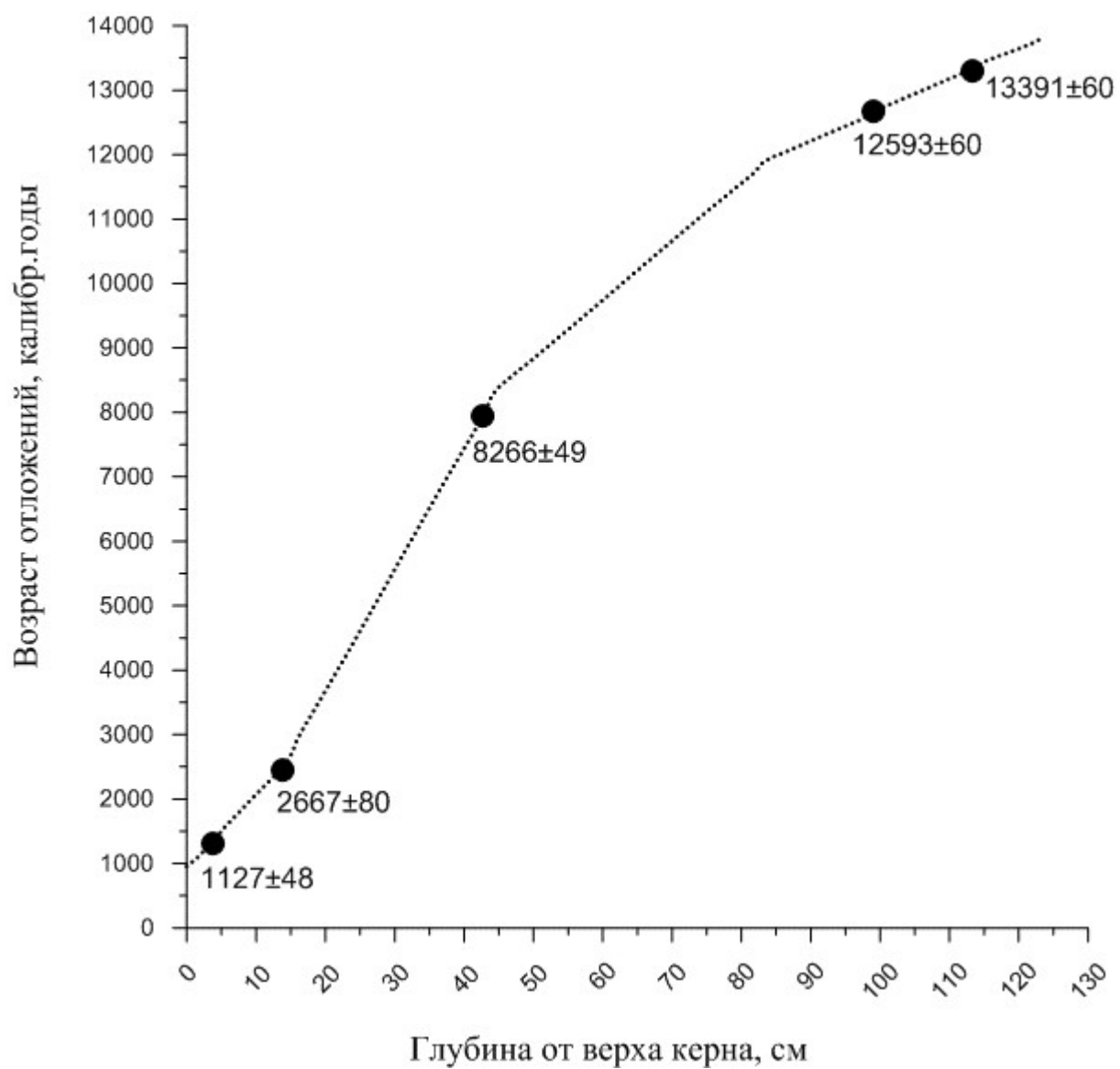
\*\*BINP-NSU – Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск; Новосибирский государственный университет

\*\*\*ООУ – общий органический углерод

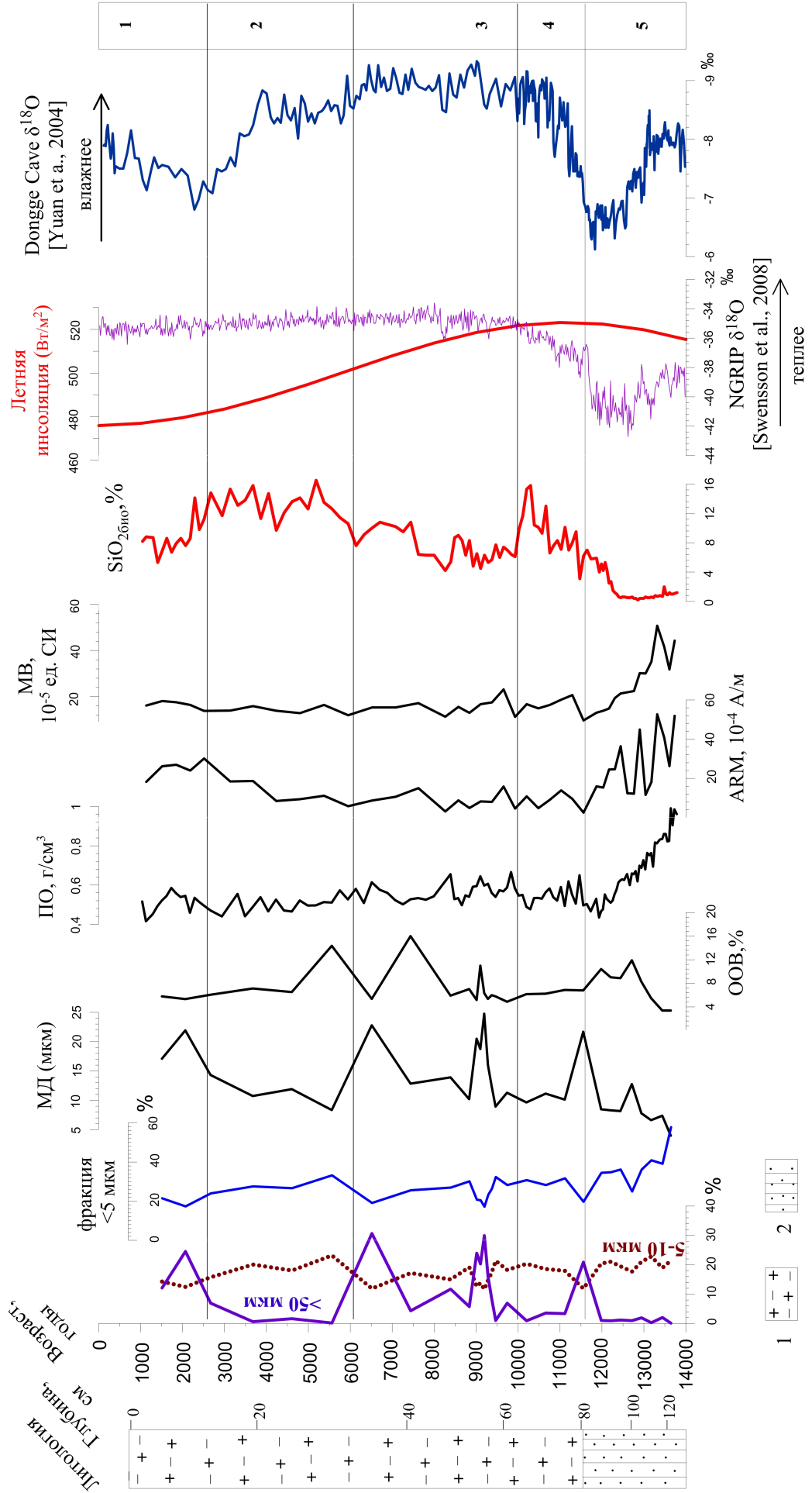








Этапы природной среды



### Этапы природной среды

