

УДК 551.583.7

**ОБ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ОЗЕРА БАЛХАШ (КАЗАХСТАН)
ПО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ***П.С. Крылов, Д.К. Нургалиев, П.Г. Ясонов***Аннотация**

Статья посвящена изучению истории развития озера Балхаш. Целью исследования являлось получение предварительных материалов о строении озерной котловины, мощности и характере донных отложений, их генезисе и эволюции по сейсмоакустическим данным. Впервые получены сейсмоакустические разрезы высокого разрешения. Сеймостратиграфический анализ полученных данных показал, что в истории озера наблюдалось несколько этапов. На акустических профилях выделены тракты низкого и высокого уровня озера, зоны эрозии, перерывы в осадконакоплении.

Ключевые слова: сейсмоакустические исследования, донные отложения современных озер, сеймостратиграфия, озеро Балхаш.

Введение

Современные озера и их донные отложения являются великолепным архивом записей изменений окружающей среды и климата за последние тысячелетия. Существует большое число методов исследования этих архивов – кернов донных отложений [1–4]. Кроме того, есть дистанционные методы изучения истории озер и главных этапов их развития, основанные на сейсмоакустических исследованиях [5, 6]. Расшифровка акустических (сейсмических) разрезов возможна с использованием базовых понятий секвенс-стратиграфии, которая включает следующие этапы: 1) анализ сейсмических комплексов; 2) анализ сейсмических фаций; 3) анализ уровня водоема [7].

В настоящей работе рассмотрен и проанализирован сейсмоакустический разрез озера Балхаш, выделено 8 стратиграфических единиц и определен уровень водоема для каждой единицы.

Общая характеристика озера Балхаш

Балхаш – бессточное озеро на юго-востоке Казахстана, имеет следующие характеристики: площадь 17–22 тыс. км², глубина до 26 м, длина 605 км, ширина до 74 км. Озеро Балхаш делится проливом Узун-Арал шириной в 3 км на две части, которые резко различаются: западная часть (мелководная с пресной водой) и восточная часть (глубокая и имеет большую соленость от 3.5 до 6 г/л). В западную часть Балхаша впадает крупная река Или (80% всей притока воды), в восточную – небольшие реки Каратал, Аксу, Лепсы, Аягуз и т. д. Озеро ежегодно замерзает, лед обычно держится с ноября по март [8].

История озера Балхаш

В литературных источниках [9, 10] приведены основные этапы развития озера за последние 10 тыс. лет. В раннеголоценовое время происходило увлажнение климата. Это способствовало образованию древнебалхашского озера. Климатические условия последовавшей древнебалхашской регрессии ($8300 \pm 100 \dots 5600 \pm 100$ лет тому назад) отличались аридностью. Сухой жаркий климат, незначительный обмен между отдельными частями, превращение впадин Балхаша в изолированные и полуизолированные водоемы, сокращения поступления речных вод способствовали увеличению солености, изменению гидрохимического режима и соотношения между основными ионами. На осушившихся площадях озера в это время шло образование эоловых наносов в виде дюн за счет ветровой переработки древнебалхашских озерных песчаных отложений. В начале балхашского времени произошли коренные изменения природных условий, приведшие к образованию водоема, превышающего по своим размерам современный Балхаш. Быстрому поднятию уровня и развитию балхашской трансгрессии способствовало впадение в озеро р. Лепсы. Это произошло около 5 тыс. лет тому назад в эпоху бронзы, когда под влиянием тектонических подвижек по Лепсинскому сбросу сток по Жолдыбеку полностью прекратился, а р. Лепса вторглась по межрядовым понижениям в эоловый песчаный массив и возвратилась в старое русло, сформировавшееся в древнебалхашское время. Таким образом, развитию балхашской трансгрессии способствовали как благоприятные климатические условия, так и впадение в этот период рек Или и Лепсы. Истощение горных ледников и аридизация климата привели к развитию балхашской регрессии. Аридизация охватила весь Казахстан около 4600 лет тому назад и продолжалась весь суббореал. Начало балхашской регрессии совпало с началом суббореала. По данным радиоуглеродного метода, абсолютный возраст ее 4380 ± 150 лет. Регрессия по времени была незначительной и продолжалась не более 1000 лет. Увеличение водности рек в связи с увеличением увлажнения климата на водосборных площадях привело к развитию новобалхашской трансгрессивной стадии, в период которой уровень Балхаша на 2.5–3 м превышал современный. Новобалхашская трансгрессия была относительно кратковременной, на что указывают полученные датировки абсолютного возраста (2690–3580 лет тому назад), а также незначительные мощности (0.15–0.45) отложений. Наступившая в дальнейшем новобалхашская регрессия привела к сокращению площади водоема и увеличению его солености.

В течение современной трансгрессии (в 1 в. н. э.) климат периодически увлажнялся и характеризовался незначительными по времени похолоданиями. На протяжении данной стадии зафиксировано несколько межвековых эпох изменения температуры и увлажненности, что сказывалось на уровне водоема. За это время его уровень повышался на 2.5 м выше современного и понижался на 3 м ниже.

Таким образом, Балхаш прошел сложный путь развития. На протяжении этого промежутка времени происходили неоднократные поднятия и понижения уровня, периодически изменялись условия увлажненности климата и водообмена между отдельными плесами, трансформировались гидрохимический и гидробиологический режимы озера.

Методика исследований

Сейсмоакустическое профилирование проводилось с помощью специализированного комплекса, разработанного и изготовленного на базе КФУ. В состав комплекса входят источник упругих волн, приемник, сейсмостанция, ноутбук, GPS-приемник, надувная лодка, электромотор, элементы электрического питания. В качестве источника упругих колебаний использовался индукционный излучатель, в зарубежных литературных источниках получивший название *boomer*. Конструктивно излучатель представляет собой забортное буксируемое устройство-катамаран. Излучатель буксируется на удалении 2 м от борта исследовательского катера, на него по 3-жильному кабелю подается низковольтное (12 В) питание и импульсы управления. В качестве источника электрической энергии высоковольтного преобразователя излучателя использовалась аккумуляторная батарея емкостью 150–200 А·ч, обеспечивая непрерывную работу излучателя в течении 5–8 ч. Созданная конструкция излучателя и его системы управления позволила получить электрическую энергию 90–144 Дж при величине накопительной емкости в 80 мкФ и напряжении 1.5–1.9 кВ. Минимальный период следования при этом составил 2 с. В используемой системе наблюдения непрерывного сейсмопрофилирования по принципу центрального луча применялось одноканальное приемное устройство. Данное устройство представляет собой линейную группу из 10 пьезоприемников на базе 100 см. Приемное устройство крепится через акустический изолятор за бортом лодки на глубине 0.2 м. Приемник GPS использовался для координатной привязки профилей, привязки пикетов возбуждения упругих колебаний, локации судна.

Исследования были проведены в августе 2012 г. в 60 км восточнее от г. Балхаш.

Результаты

Сейсмоакустическое профилирование оз. Балхаш проводилось по двум профилям субширотного простирания, общей протяженностью 12 км (рис. 1). Как можно видеть по временному разрезу профиля 1, проходящего вдоль залива, котловина озера разделена на три блюдцеобразные котловины, заполненные современным осадками (рис. 2). Оцифровка горизонтального масштаба соответствует пикетам профиля, по вертикали отложена глубина в метрах относительно зеркала воды. Максимальная глубина относительно зеркала воды 8.5 м. Максимальная мощность современных осадков западной котловины по нашим оценкам колеблется в пределах 13 м (даны значения, приведенные к скорости звука в воде 1500 м/с, уточнение цифр требует дополнительных исследований). Заполнение котловин осадком происходит вследствие повышения уровня озера, осадки залегают по схеме подошвенного налегания. В западной котловине выделяются слои с четкой границей отражения. На пикетах 122–127 наблюдается выход коренных пород на поверхность дна озера.

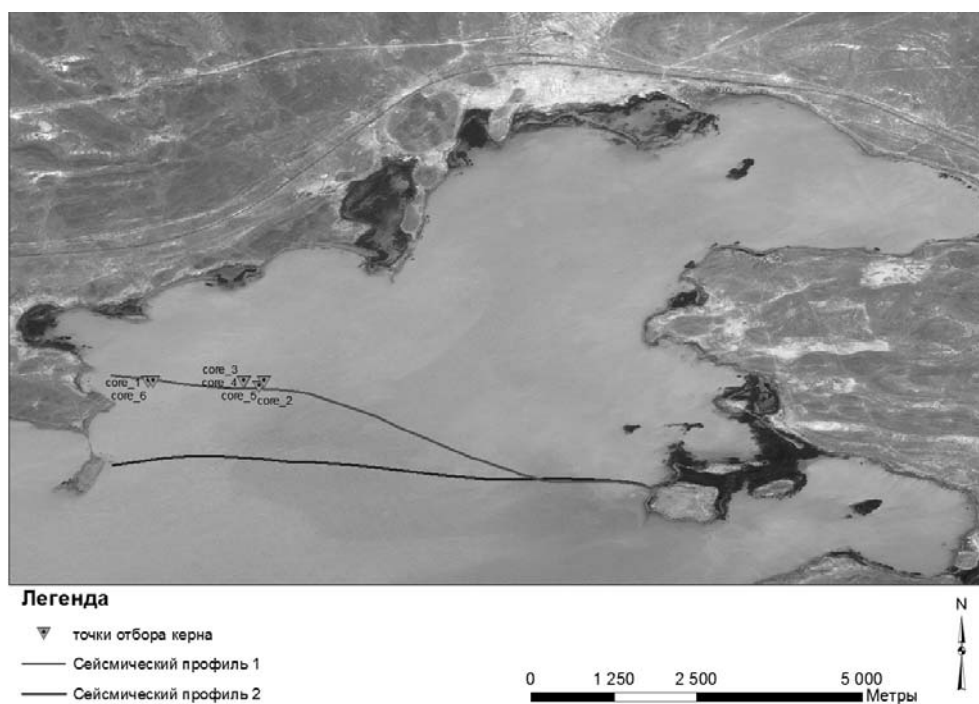


Рис. 1. Схематичное расположение профилей и точек отбора керна

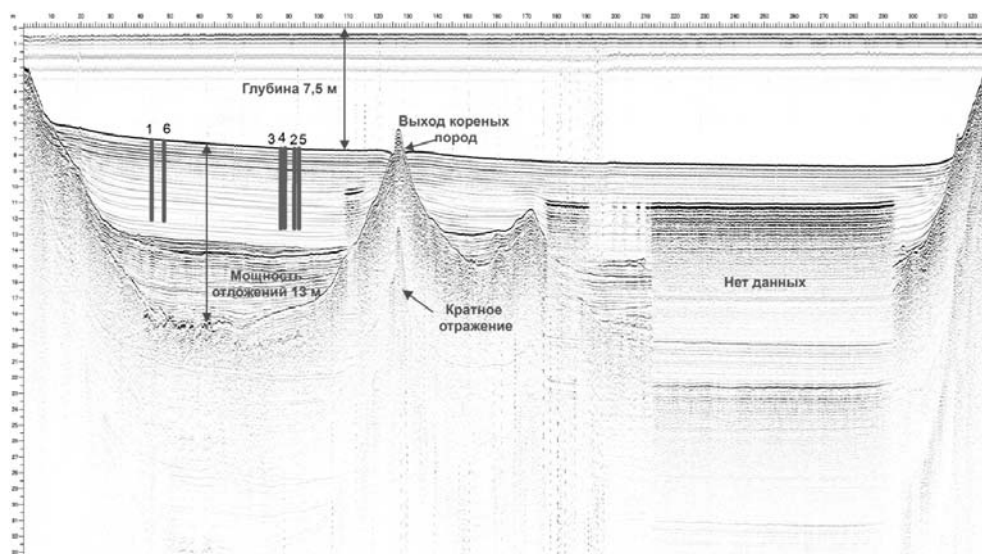


Рис. 2. Сейсмоакустический разрез по профилю 1

Сеймостратиграфический анализ

Полученные в результате обработки временные разрезы демонстрируют достаточно резкую дифференциацию акустических свойств донных осадков. Характер волновых полей на сейсмоакустических разрезах во многом зависит

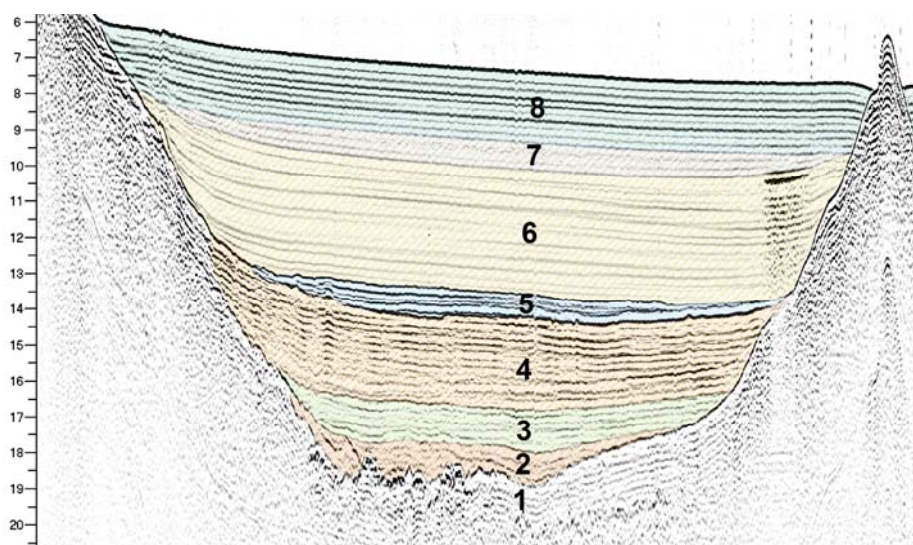


Рис. 3. Сейсмофациальные единицы заполнения с налеганием. Налечающие отражения одинаковы и имеют постоянную частоту. Хаотическая картина в подошвенной части сменяется слоистой картиной налегания

от условий, в которых происходило формирование озера: геоморфологические особенности территории, генезис озера, колебания климата наложили свой отпечаток на процессы осадконакопления и, соответственно, обусловили тип волновой картины.

На сейсмоакустическом профиле № 1 на оз. Балхаш выделяются 4 типа волновой картины: хаотическая, нерегулярно слоистая, слоистая, тонкослоистая. Границы между этими типами в некоторой мере условные. Анализ прибрежной геологической ситуации позволяет достаточно репрезентативно определить на сейсмическом профиле поверхность палеозойского фундамента. Очертания отражающих горизонтов наглядно подтверждают факт резких различий в условиях осадконакопления в пределах акватории [7], что позволяет выделить 8 сейсмофациальных единиц (см. рис. 3).

Приведем их описание.

1. Мощность > 1 м. Наблюдается хаотическая волновая картина, которая обычно формируется за счет отражений от осадков, сложенных грубообломочным плохо сортированным материалом временных и постоянных водотоков. Такой тип отражения также характерен для отложений солей при практически полном испарении воды, что, вероятно, свидетельствует о преобладании в то время жаркого климата.

2. Мощность 1 м. Волновая картина характеризуется как нерегулярно слоистая. Тракт высокого стояния уровня озера, началось заполнение осадками.

3. Мощность 1 м. Волновая картина слоистая. Происходит повышение уровня озера, с небольшим событием (перерывом) в осадконакоплении, о чем свидетельствует прослеживаемая граница между 3-м и 4-м слоями.

4. Мощность 2.5 м. Наблюдается слоистая волновая картина. Тракт высокого стояния уровня озера, осадки накапливаются равномерно.

5. Мощность 0.7 м. Наблюдается нерегулярно слоистая волновая картина. Тракт низкого стояния уровня озера, перерыв в осадконакоплении.

6. Мощность 3.4 м. На акустическом профиле наблюдаются несогласные отражения, характерные для нерегулярно слоистой волновой картины. Тракт высокого стояния уровня озера, осадконакопление происходит с большой скоростью на протяжении длительного времени.

7. Мощность 0.9 м. Тонкослоистая волновая картина, характерная для переслаивания ила и песка. Тракт низкого стояния уровня озера. Происходит отступление слоя в сторону бассейна и образование регрессивного подошвенного налегания.

8. Мощность 2 м. Слоистая волновая картина. Тракт высокого стояния уровня озера. Параллельные отражения прослеживаются на протяжении всего разреза на глубинах 6.5–8.5 м и характеризуют равномерное и последовательное налегание слоев. Такая картина с последовательным налеганием и продвижением слоев в сторону суши характерна для схемы трансгрессивного подошвенного налегания.

Обсуждение

Для отложения оз. Балхаш характерны сейсмические фации с подошвенным налеганием. Внутренние отражения фаций сравнительно более однородны – от параллельных до плавно расходящихся – и обладают четко выраженной непрерывностью и переменными амплитудами. Отложения фации заполнения с подошвенным налеганием накапливаются благодаря природным гравитационным потокам, о чем свидетельствует приуроченность этих отложений к пониженным участкам рельефа дна и подошвенное налегание их на вмещающие породы. Параллельные непрерывные отражения, создаваемые этими развитыми на обширных пространствах породами, характеризуют их как отложения, вероятнее всего, связанные с относительно низкоскоростными мутьевыми потоками. Таким отражениям, по-видимому, должны соответствовать глины и алевроиты.

Предварительное датирование обнаруженных событий на сейсмоакустических профилях можно провести на основании имеющихся представлений об истории развития озера [9, 10].

Фации 1 и 2 могли формироваться в эпоху от 8300 до 5600 лет. Фации 3 и 4 вплоть до 4380 ± 150 лет (подошва фации 5). Фация 5 может быть коррелирована с аридизацией в начале суббореала от 4600 до 4000 лет тому назад. Дальнейшие детали, к сожалению, не имеют датировок.

Необходимо отметить очень высокие скорости накопления осадков, что позволит провести очень детальные палеогеофизические реконструкции по кернам донных отложений.

На сейсмограмме по профилю 1 осадки восточной котловины, вероятно, характерны для отложений газонасыщенных илов с аномально низкими скоростями (140–300 м/с), аномально высоким поглощением и высоким значением коэффициента отражения. Эти отложения оказывают сильное экранирующее воздействие. Как правило, их распространение в плане является крайне хаотичным. В этих местах происходит потеря корреляции, и на акустических разрезах она проявляется в виде областей белого шума.

Выводы

Таким образом, основные результаты настоящего исследования заключаются в следующем.

1. Впервые получен детальный сейсмоакустический разрез донных отложений оз. Балхаш, на котором выделены 8 стадий эволюции озера.

2. Анализ сейсмоакустического разреза позволил выделить в истории озера 4 тракта высокого и 2 тракта низкого уровней стояния озера. Эти стадии развития озера сопоставлены с имеющимися представлениями об истории озера и получено общее представление о возрасте выявленных событий. В целом имеющиеся представления об эволюции оз. Балхаш согласуются с полученными сейсмоакустическими данными.

3. Обнаружена необычно высокая скорость накопления осадков, позволяющая провести детальные палеоклиматические и палеомагнитные реконструкции по кернам донных отложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-05-01032).

Литература

1. *Субетмо Д.А.* Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции. – СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. – 344 с.
2. *Nourgaliev D.K., Yasonov P.G., Oberhaensli H., Heller F., Borisov A.S., Chernova I.Yu., Akdasov E.I., Burov B.V.* Paleomagnetic correlation of sedimentary sequences: The use of secular geomagnetic variations for the differentiation and correlation of Holocene Aral Sea deposits // *Izv. Phys. Solid Earth*. – 2007. – V. 43, No 10. – P. 836–843.
3. *Нургалиев Д.К., Утемов Э.В., Ясонов П.Г., Нургалиева Н.Г., Косарева Л.Р.* Остатки магнитотактических бактерий в отложениях современных озер – новый инструмент палеогеофизики // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*. – 2009. – Т. 151, кн. 4. – С. 180–191.
4. *Nourgaliev D., Heller F., Borisov A.S., Hajdas I., Bonani G., Iassonov P.G., Oberhänsli H.* Very high resolution paleosecular variation record for the last ~1200 years from the Aral Sea // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30, No 17. – Art. 1914, P. 4-1-4-4. – doi: 10.1029/2003GL018145.
5. *Moernaut J., Verschuren D., Charlet F., Kristen I., Fagot M., De Batist M.* The seismic-stratigraphic record of lake-level fluctuations in Lake Challa: Hydrological stability and change in equatorial East Africa over the last 140 kyr // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2010. – V. 290, No 1–2. – P. 214–223. – doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.023.
6. *Zhang Y., Wünnemann B., Bezrukova E.V., Ivanov E.V., Shchetnikov A.A., Nourgaliev D., Levina O.V.* Basin morphology and seismic stratigraphy of Lake Kotokel, Baikal region, Russia // *Quatern. Int.* – 2013. – V. 290–291. – P. 57–67. – doi: 10.1016/j.quaint.2012.11.029.
7. *Сейсмическая стратиграфия: в 2 т. / Под ред. Ч. Пейтона.* – М.: Мир, 1982. – Т. 1. – 374 с.
8. *Абросов В.Н.* Озеро Балхаш. – Л.: Наука, 1973. – 180 с.
9. *Севастьянов Д.В., Мамедов Э.Д., Румянцев В.А.* История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал. – Л.: Наука, 1991. – 304 с.

10. Сапожников Д.Г. Современные осадки и геология озера Балхаш. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 207 с. (Труды Ин-та геол. наук, Вып. 132, Геол. сер., № 53)

Поступила в редакцию
24.11.13

Крылов Павел Сергеевич – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: sprint@front.ru

Нурғалиев Данис Карлович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, проректор по научной деятельности, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: Danis.Nourgaliev@kpfu.ru

Ясонов Павел Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник НИЛ палеомагнетизма и магнетизма горных пород, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: p.yasonov@mail.ru

* * *

THE HISTORY OF LAKE BALKHASH (KHAZAKHSTAN) BASED ON HIGH-RESOLUTION SEISMIC PROFILES

P.S. Krylov, D.K. Nurgaliev, P.G. Yasonov

The article deals with the history of Lake Balkhash. The aim of the study was to obtain preliminary materials on the structure of the lake's basin, the thickness and nature of the bottom sediments and their genesis and evolution according to seismic data. High-resolution seismic profiles were obtained for the first time. A seismic stratigraphy analysis showed that there were several stages in the evolution of the lake. Sections of high and low lake levels were identified on the seismic profiles.

Keywords: acoustic research, bottom sediments of modern lakes, seismic stratigraphy, Lake Balkhash.

References

1. Subetto D.A. Bottom Sediments of Lakes. Paleolimnological Reconstructions. St. Petersburg, Herzen State Pedagogical University of Russia, 2009. 344 p. (In Russian)
2. Nourgaliev D.K., Yasonov P.G., Oberhaensli H., Heller F., Borisov A.S., Chernova I.Yu., Akdasov E.I., Burov B.V. Paleomagnetic correlation of sedimentary sequences: The use of secular geomagnetic variations for the differentiation and correlation of Holocene Aral Sea deposits. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2007, vol. 43, no. 10, pp. 836–843.
3. Nurgaliev D.K., Utemov E.V., Yasonov P.G., Nurgalieva N.G., Kosareva L.R. Remains of magnetotactic bacteria in modern lake sediments as a new tool of paleogeophysics. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2009, vol. 151, no. 4, pp. 180–191. (In Russian)
4. Nourgaliev D., Heller F., Borisov A.S., Hajdas I., Bonani G., Iassonov P.G., Oberhänsli H. Very high resolution paleosecular variation record for the last ~1200 years from the Aral Sea. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 17, Art. 1914, P. 4-1–4-4. doi: 10.1029/2003GL018145.
5. Moernaut J., Verschuren D., Charlet F., Kristen I., Fagot M., De Batist M. The seismic-stratigraphic record of lake-level fluctuations in Lake Challa: Hydrological stability and change in equatorial East Africa over the last 140 kyr. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, vol. 290, no. 1–2, pp. 214–223. doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.023.
6. Zhang Y., Wünnemann B., Bezrukova E.V., Ivanov E.V., Shchetnikov A.A., Nourgaliev D., Levina O.V. Basin morphology and seismic stratigraphy of Lake Kotokel, Baikal region, Russia. *Quatern. Int.*, 2013, vol. 290–291, pp. 57–67. doi: 10.1016/j.quaint.2012.11.029.

7. Peyton Ch. (ed.) Seismic Stratigraphy. Moscow, Mir, vol. 1, 1982. 374 p. (In Russian)
8. Abrosov V.N. Lake Balkhash. Leningrad, Nauka, 1973. 180 p. (In Russian)
9. Sevastyanov D.V., Mamedov E.D., Rumyantsev V.A. History of Lakes Sevan, Issyk-Kul, Balkhash, Zaisan and Aral. Leningrad, Nauka, 1991. 304 p. (In Russian)
10. Sapozhnikov D.G. The Recent Sediments and Geology of Lake Balkhash. Moscow, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1951. 207 p. (In Russian)

Received
November 24, 2013

Krylov Pavel Sergeevich – PhD Student, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: *sprint@front.ru*

Nurgaliev Danis Karlovich – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Vice-Rector for Research, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: *Danis.Nourgaliev@kpfu.ru*

Yasonov Pavel Georgievich – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Leading Research Fellow, Research Laboratory of Paleomagnetism and Rock Magnetism, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: *p.yasonov@mail.ru*