

Применение компьютерной рентгеновской томографии для исследования процессов осадконакопления в озёрах Республики Татарстан

© 2016. Д. В. Иванов¹, к. б. н., зам. директора,
И. И. Зиганшин¹, к. г. н., с. н. с., Р. Р. Сафин², зав. лаб., Д. Р. Гайнуллина¹,

¹ Институт проблем экологии и недропользования АН РТ,
420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28,

² АО «Региональный центр инжиниринга в сфере химических технологий»,
422624, Россия, Республика Татарстан, с. Столбище, ул. Лесхозовская, 32,
e-mail: water-rf@mail.ru, rce-chem@mail.ru

В числе инструментальных методов варвахронологических исследований донных отложений, направленных на установление их абсолютного и относительного возраста, широкое развитие в мире получила методика компьютерной рентгеновской томографии (КРТ), преимуществом которой является высокая прецизионность при выделении годовых слоёв, неразрушающее действие на образец и возможность диагностики внутренней структуры ядра. В России применение КРТ для анализа структуры донных отложений находится на начальной стадии развития. Впервые для озёр Республики Татарстан отработана методика использования КРТ для определения параметров осадконакопления и структуры донных отложений. Применительно для компьютерного томографа Vltome | m240 (Phoenix X-ray) отработаны основные режимы сканирования воздушно-сухих образцов донных отложений. Метод КРТ в совокупности с данными полевого и лабораторного исследования кернов и их отдельных фрагментов позволил с высокой степенью достоверности определить скорость современного осадконакопления в трёх карстовых озёрах республики: Атаманское и Большое Глубокое – 2 мм/год, Пиголи – 5 мм/год. Скорость озёрного осадконакопления находится в пределах «фоновых» значений, характерных для водоёмов республики. Показано, что в озере Большое Глубокое катастрофическое заиление (более 20 мм/год), имевшее место в первой половине XIX в., сменилось стабильным режимом осадконакопления с доминированием внутриводоёмных процессов синтеза и аккумуляции вещества. Выявлено наличие тонкой слоистости в структуре современных озёрных отложений, отражающее сезонную картину автохтонного и аллохтонного поступления взвешенного материала в ложе водоёма. Отмечены эффект уплотнения внешней части кернов в процессе отбора пробы стратиграфической трубкой ГОИН, обусловленный воздействием на её внутреннюю часть фрикционных и деформационных сил, а также эффект вертикального смещения годовых слоёв осадка, которые следует учитывать при интерпретации получаемых данных. В отдельных фрагментах исследованных кернов озёр Пиголи и Атаманское слоистость осадков не проявилась, что объясняется как стабильным режимом осадконакопления в данных водоёмах, так и их гидрологическими, морфометрическими и биопродукционными особенностями.

Ключевые слова: донные отложения, варвахронология, компьютерная рентгеновская томография, озёра, Республика Татарстан.

Application of X-ray computer tomography for researching sediment processes in lakes of the Republic of Tatarstan

D. V. Ivanov¹, I. I. Ziganshin¹, R. R. Safin², D.R. Gaynullina¹,

¹ Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences,
28 Daur'skaya St., Kazan, Russia, 420087,

² Joint-stock company «Regional engineering center for chemical technologies»,
32 Leshozovskaya St., Stolbishe, Russia, 422624,
e-mail: water-rf@mail.ru, rce-chem@mail.ru

Among the instrumental methods of varvochronological research of bottom sediments aiming at establishing their absolute and relative age, the method of X-ray computed tomography (CT) extensive has been developed. Its advantage is in high precision in the determination of annual layers, non-destructive effect on the sample and the possibility of diagnosing the internal structure of the core. In Russia the use of CT for the analysis of sediment structure is still at an early stage of development. For lakes of the Republic of Tatarstan CT methods of determining sedimentation

parameters and sediments structure were used for the first time. The basic modes of scanning air-dry samples of bottom sediments were worked out for «Phoenix|X-ray» computer tomograph. The CT method with the data of field and laboratory researches of cores and their individual fragments allowed with a high degree of accuracy to determine the rate of sedimentation in three karst lakes of the republic: the Atamanskoe and the Bolshoe Glubokoe – 2 mm/year, the Pigoli – 5 mm/year. The sedimentation rate is within the «background» limits typical for the natural reservoirs of the Republic. It's shown that in the Bolshoe Glubokoe lake the disastrous siltation (over 20 mm/year) characteristic for the first half of XIX century has changed into a stable regime of sedimentation dominated by inner processes of synthesis and accumulation of the substance. Fine stratification in the structure of modern lake sediments reflecting the seasonal pattern of autochthonous and allochthonous admission of suspended material in the reservoir's bottom was revealed. The effect of sealing of the core outside part during sampling with stratigraphic SOI tubes was noticed, it takes place due to the impact of friction and deformation forces on the interior. Also the effect of vertical displacement of the annual layers of sediment was stated. The above mentioned effects should be considered during interpreting the data. In some fragments of investigated cores of the Pigoli and the Atamanskoe the stratification of sediments wasn't found due to a stable regime of sedimentation in these reservoirs, as well as to their hydrological, morphometric and bioproductual features.

Keywords: sediments, varvchronology, X-ray computed tomography, lakes, the Republic of Tatarstan.

Изучение и оценка состава и свойств донных отложений (ДО) озёр являются неотъемлемой составляющей исследований водных экосистем. С учётом поставленных задач они могут быть ориентированы на характеристику условий обитания бентосных организмов, выяснение роли ДО в формировании гидрхимического режима водных масс, изучение параметров загрязнения илов органическими и неорганическими веществами и разработку мероприятий по экологической реабилитации водоёмов. ДО являются удобным объектом при палеорекострукциях ландшафтов, так как содержат биологическую и химическую информацию о биоклиматических и геохимических условиях за весь период существования водоёма. В этом направлении выполнен целый ряд исследований на разнотипных озёрах мира [1].

Изучение параметров осадконакопления приобретает особое значение в целях оценки заиления озёр, прудов и водохранилищ. Получаемые при этом данные позволяют не только характеризовать текущее состояние водных объектов, но и прогнозировать возможные уровни их заиления при разных вариантах развития событий, а также предложить вполне конкретные природоохранные рекомендации, например, по полному или частичному изъятию из водоёма ДО, строительству очистных сооружений для ликвидации сброса взвешенных веществ и т.д.

Современные методы изучения состава и строения ДО озёр многообразны. Начиная с 1980-х гг. при определении параметров озерного осадконакопления стал использоваться метод компьютерной рентгеновской томографии (КРТ) [2]. Метод основан на неразрушающем изучении внутренней структуры материала и представляет собой послойное ис-

следование структуры неоднородных образцов пород в рентгеновском излучении, основанное на зависимости линейного коэффициента поглощения в рентгеновском диапазоне от состава и плотности вещества. Метод отличается неdestructивностью, простотой процедуры анализа, оперативностью, а также высокой информативностью получаемых данных. Использование соответствующего программного обеспечения позволяет создавать 3D-модели образца.

В отечественной практике методика КРТ используется преимущественно при изучении кернов геологических отложений [3]. Применение томографии для анализа состава и структуры ДО носит единичный характер [4, 5], несмотря на то, что позволяет с высокой точностью определять мощность годовых слоёв и целый ряд важных свойств ДО, которые невозможно установить другими известными способами.

Материалы и методы

Для исследования в 2014–2015 гг. структуры и хронологии ДО методом КРТ было использовано несколько фрагментов кернов ненарушенного сложения, отобранных в профундали озер Республики Татарстан (РТ) трубкой ГОИН TF1.

1) КERN ДО оз. Большого Глубокого г. Казани. Мощность керна 80 см, его описание опубликовано в работе [6]. Колонка отложенный после высушивания распалась на годовые слои, хорошо отличимые визуально. Для КРТ выбран фрагмент керна с глубины 8,5–13 см, имеющий заметную микрослоистость, но не разделившийся при высушивании. По причине небольшой мощности слоёв визуальный подсчёт их количества осуществить было

невозможно. Предварительные оценки показали, что верхняя часть колонки озёрных отложений содержит 47 микрослоёв, отражающих, соответственно, 47 годовых циклов седиментации (с 1967 по 2014 гг.).

2) Керн ДО оз. Атаманского (Спасский район, с. Три озера, памятник природы регионального значения). Тип отложений – глинистый ил. Для исследования использован фрагмент 35–42 см.

3) Керн ДО оз. Пиголи Лаишевского района. Колонка глинистого ила мощностью 46 см. Слоистость при высушивании не проявилась. Расчётным методом определена скорость осадконакопления – 10 мм/год. Для исследования использован фрагмент керна 7–17 см.

Эксперименты по изучению структуры ДО выполнены в лаборатории рентгенологических исследований ОАО «Региональный центр инжиниринга в сфере химических технологий» на компьютерном томографе Vtome | m240 (Phoenix X-ray) компании «GE Sensing & Inspection Technologies GmbH». Для визуализации процесса настройки и сканирования использовано программное обеспечение VGStudioMAX 2.1. Важно отметить, что для обеспечения высокого качества КРТ перед каждым получением изображения всегда должны создаваться новые корректировки. Изображения получаются непрерывно с использованием текущего времени интегрирования. Чем больше интегрирований используется на изображение, тем меньше видны помехи и тем больше времени занимает получение изображения. Для каждого из кернов получено 2000 изображений. Время сканирования одного образца составило около 90 мин. Компьютерные томограммы фрагментов кернов ДО представлены на рисунке 1.

Результаты и обсуждение

Варвохронология озёрных отложений

Озёрные отложения, как и любые слоистые геологические образования, представляют собой «книгу записи» информации о геологическом (голоценовом) или ближайшем (несколько десятилетий) историческом времени, рассказывающую о природно-климатических или антропогенных событиях, происходивших на данной территории. Для оценки антропогенного воздействия данные о естественных изменениях параметров среды в прошлом, которые предоставляет нам изучение слоистых ДО, имеют огромное значение. По своей природе, обладая свойством дискретности, слоистые ДО позволяют количественно оценивать

изменения природных условий в период их накопления: литологический состав и мощность слоёв позволяют судить об изменениях климата, пыльца растений и диатомовые водоросли, содержащиеся в ДО – об изменениях растительного покрова и состава воды водоёма, соответственно.

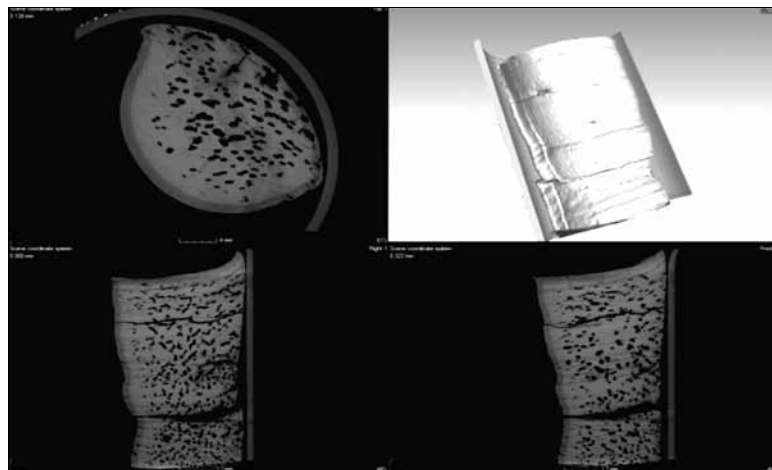
Хронология ДО основана на определении их возраста путём подсчёта слоёв и соотношения их со временем образования. За рубежом этот метод принято называть «варвохронологическим», а также методом де Геера (De Geer). Условием применения метода варвов является наличие сезонной слоистости осадка, когда в течение года формируется пара слоёв, обычно различающихся гранулометрическим составом и окраской.

Выделение таких пар (варвов) и их подсчёт позволяет определить продолжительность накопления осадков и их относительный возраст. У исследователя не всегда есть возможность достоверно оценить количество слоёв. Годичные слои могут быть слишком тонкими или недостаточно контрастно окрашенными. С другой стороны, при катастрофическом заилении годичные слои могут иметь мощность более 20 см. В этом случае сезонные циклы седиментации могут быть ошибочно интерпретированы как годичные слои.

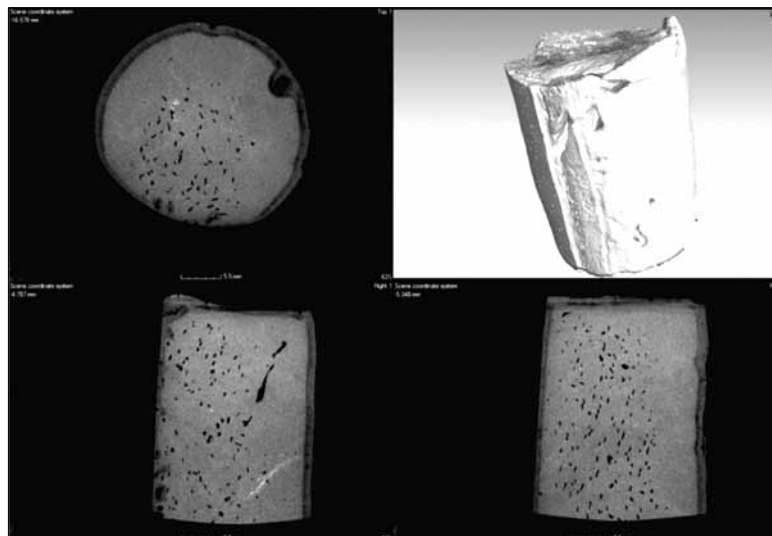
Хронология донных отложений озёр Республики Татарстан

Выполненные ранее исследования состава и свойств ДО озёр РТ позволили установить среднюю скорость современного осадконакопления в озёрах РТ – 5 мм/год [6–8]. При этом отмечалась значительная вариабельность мощности годовых слоёв осадка: от десятых долей миллиметра до нескольких сантиметров. Это связано с тем, что в пределах современной территории РТ в течение последних 200 лет произошли существенные перестройки в характере и темпах озёрного осадконакопления. Они обусловлены сведением лесов и распашкой земель, что вызвало активизацию эрозионных явлений и ускорение процессов заиления озёр.

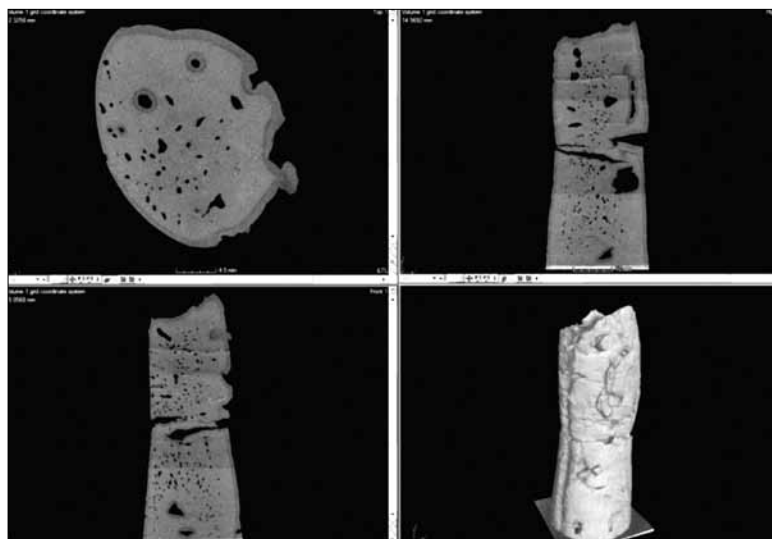
При исследовании керна ДО оз. Атаманское визуально не было отмечено дифференциации в строении отложений: он выглядел однородным по цвету и структуре. При высушивании керн распался на несколько сегментов длиной от 1 до 9 см. Расслоение керна может быть обусловлено двумя причинами: 1) отделением друг от друга годовых слоёв отложений, 2) уменьшением объёма при испарении воды и последующим «разрывом»



оз. Б. Глубокое



оз. Атаманское



оз. Пиголи

Рис. 1. Рентгенограммы фрагментов кернов ДО

сплошности. В первом случае отделение одного годового слоя осадка от другого чаще всего происходит, если имеет место неоднородность в годовом цикле седиментации. Например, когда аллохтонное накопление грубозернистых осадков с малым содержанием органического вещества сменяется аккумуляцией автохтонных глинистых частиц и биогенных взвесей. Последние, осаждаясь на дно водоёма, формируют своеобразную «жировую прослойку» между текущим и последующим годовыми циклами осадконакопления. По линии этой прослойки и происходит разделение годовых слоёв, что даёт возможность максимально точно рассчитать их количество и связать мощность слоя со временем его образования.

В зависимости от характера осадконакопления в конкретном водоёме образование такого рода прослоек может и не наблюдаться, что мы, в частности, отмечали в ДО оз. Атаманское. Визуальным методом выделение здесь годовых слоёв и точное определение скорости накопления ДО представлялось затруднительным. В связи с этим с использованием рентгеновской томографии был изучен характер слоистости фрагмента керна ДО мощностью 7 см, охватывающего интервал глубин 35–42 см (рис. 1). Анализ томограммы показал, что в вертикальной проекции керна слоистость отсутствует, отражая тем самым стабильный режим осадконакопления. В таких мелководных озёрах как Атаманское (максимальная глубина 2 м) на формирование варвов может оказывать влияние ряд факторов, в т. ч. высокая активность организмов бентоса, перемешивающих ДО, а также взмучивание ДО и переотложение взвешенных частиц за счёт движений воды, вызванных ветром.

При КРТ сегмента керна оз. Атаманское отчётливо проявились внутренние поры иловых отложений. Поровое пространство играет важную роль в газовом и водном режимах, обеспечивая условия существования донных организмов. В ДО поры могут быть образованы ходами беспозвоночных – представителей донной фауны. Определённая доля порозности обязана процессам газообразования при деструкции органического вещества ДО, сопровождаемой выделением в придонные слои воды метана, сероводорода, углекислого газа. При этом образуются пузырьки газа, создающие мельчайшие полости в теле осадка. Количество пор и их размер меняются с глубиной. Это, в частности, заметно при сравнении поверхностных слоёв ДО оз. Б. Глубокое и более глубоких слоёв оз. Атаманское (рис. 1).

Уменьшение числа пор и их диаметра связано с уплотнением осадка, а также со снижением интенсивности микробиологической деструкции органики по мере «старения» слоя.

Отметим характерный эффект, проявившийся только при рентгеновском сканировании, связанный с уплотнением внешнего слоя керна при проникновении трубки ГОИН в донный грунт. Он проявляется в виде потемнения окраски по периметру керна (рис. 1). Данный эффект обусловлен воздействием на внутреннюю часть колонки фрикционных и деформационных сил и подробно описан в зарубежной литературе [9], но в отечественных публикациях не нашёл своего отражения.

Ещё один эффект, характерный для отбора проб ДО при помощи гравитационных трубок, заключается в вертикальном сжатии колонки. Одни слои при этом могут сжиматься сильнее, чем другие. Это зависит от влажности слоя, его плотности, гранулометрического состава, длины колонки. Эффект уплотнения необходимо учитывать при определении мощности годовых слоёв ДО. Однако на практике такую поправку сложно реализовать.

На рисунке 2 в сегменте керна оз. Б. Глубокое обнаруживается смещение слоёв относительно друг друга, проявляющееся в нарушении параллельности сложения. Оно связано не столько с описанным выше явлением уплотнения, сколько с процессом манипуляции с трубкой ГОИН при её извлечении из воды и при дальнейшем извлечении вкладыша. Текущие слои ила верхней водонасыщенной части керна при перемещении трубки в горизонтальную плоскость смещаются относительно друг друга в зависимости от содержания в них влаги. Поэтому верхние части кернов растекаются по поверхности вкладыша, в связи с чем выделение в них годовых слоёв становится невозможным.

На томограмме фрагмента керна оз. Б. Глубокое нами выделено 26 годовых слоёв ДО (рис. 1). Мощность варвов варьирует здесь от 0,2 до 2 мм (рис. 2) и уменьшается снизу вверх, свидетельствуя о том, что осадконакопление в озере за последние 50 лет стабилизировалось и носит большей частью автохтонный характер. Средняя мощность варва в этом сегменте керна составляет 1,7 мм. Параметры осадконакопления необходимо корректировать на естественное сложение ДО во влажном состоянии, для чего требуется оценивать изменения в объёме слоёв при потере ими влаги. Уменьшение объёма керна при высушивании составило около 20%, а коэффициент пересчёта на естественную влажность – 1,2. Таким образом, средняя мощность

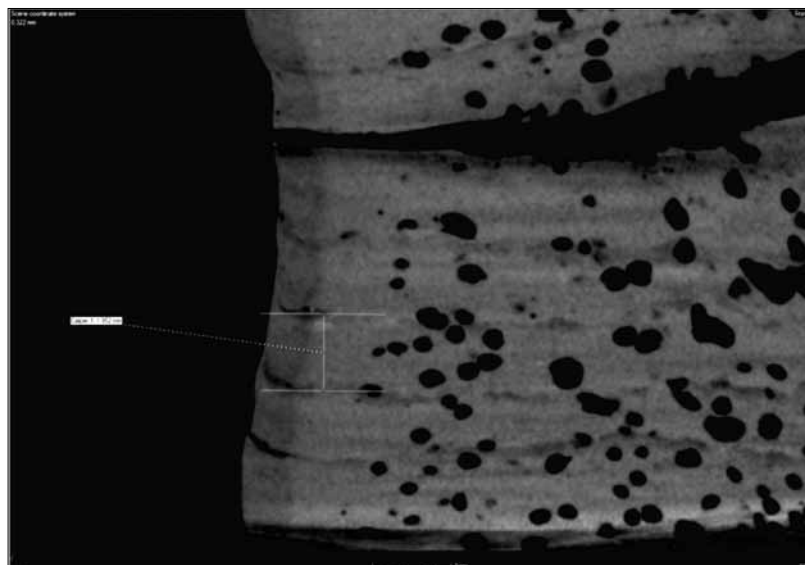


Рис. 2. Фрагмент керна оз. Б. Глубокое (увеличено): толщина варва 1,952 мм

варва в современных ДО озера составит 2,0 мм. При толщине верхнего сегмента керна 9,5 см количество годовых слоёв в нём будет равно 47. Таким образом, можно утверждать, что верхняя часть керна характеризует 47-летний период формирования ДО оз. Б. Глубокое (1967–2014 гг.), что ранее высказывалось как предположение [6].

При сравнении средней и максимальной глубин в оз. Атаманское за 1968–2015 гг. установлено, что за аналогичный период (47 лет) существенного уменьшения глубины озера за счёт заиления не произошло, а средняя скорость осадконакопления в озере не превышает 2 мм/год. Таким образом, в озёрах Б. Глубокое и Атаманское скорость накопления ДО находится на одном уровне. Прогноз заиления для обоих озёр благоприятный: при сохранении существующих темпов заиления прирост ДО за 100 лет не превысит 20 см.

По результатам оценки изменений морфометрических показателей оз. Пиголи (средняя и максимальная глубины, отметки уреза воды) за период с 1968 по 2014 гг., а также на основании данных исследования керна ДО установлено, что современная скорость осадконакопления в озере может достигать 10 мм/год. В верхней части исследованного сегмента керна чётко обозначились годовые слои мощностью 4–6 мм (рис. 1). Однако в нижней её части слоистость в процессе томографии не проявилась. В целом можно принять, что современная скорость осадконакопления в озере составляет 5 мм/год, соответствуя средней скорости осадконакопления в озёрах Татарстана.

Заключение

Компьютерная томография на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных и высокоточных инструментальных методов исследования структуры ДО, который можно применять при определении возраста отложений и установлении параметров осадконакопления в водоёмах. В отечественных научных исследованиях метод пока не нашёл широкого применения, что, по-видимому, связано не только с отсутствием необходимой приборной базы в научных центрах, но и в целом с ограниченным объёмом стратиграфических исследований озёрных отложений. Метод КРТ наиболее эффективен при наличии тонкой слоистости в структуре отложений, а также при исследовании однородных по структуре кернов, когда визуальные методы исследования не дают однозначных и достоверных результатов. Использование КРТ для исследования структуры ДО озёр РТ позволило выявить наличие вертикальных и горизонтальных деформаций в структуре отложений, возникающих в процессе отбора стратиграфических колонок гравитационной трубкой ГОИН, а также зависимость величины пористости отложений от глубины исследуемого слоя.

На основании изучения колонок ДО трёх озёр (Атаманское, Пиголи, Б. Глубокое) методом КРТ выполнена корректировка ранее полученных данных об относительном возрасте отложений и мощности отдельных варвов. Скорость современного осадконакопления в озёрах Б. Глубокое и Атаманское оценивается величиной 2 мм/год, в оз. Пиголи – 5 мм/год.

Литература

References

1. Mörner N.-A. Varve chronology // *Geochronology Methods and Case Studies*. In Tech, 2014. 204 p.
2. Herman G.T. *Fundamentals of computerized tomography: Image reconstruction from projection*. 2nd edition. London: Springer, 2009. 435 p.
3. Галкин С.В., Ефимов А.А., Кривошечков С.Н., Савицкий Я.В., Черепанов С.С. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях кернa нефтяных и газовых месторождений // *Геология и геофизика*. 2015. № 5. С. 995–1007.
4. Корост Д.В., Хомяк А.Н., Белохин В.С., Гилязетдинова Д.Р., Хлыстов О.М., Ахманов Г.Г. Позднечетвертичные отложения озера Байкал: предварительные результаты рентгентомографических исследований // *Морские исследования и образование: Сб. тез. III междунар. конф. М., 2014. С. 118–120*.
5. Гилязетдинова Д.Р., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Абросимов К.Н. Особенности состава и строения грязевых вулканов озера Байкал: предварительные результаты рентген-томографических исследований // *Морские исследования и образование: Сб. тез. III междунар. конф. М., 2014. С. 39–40*.
6. Иванов Д.В., Сонин Г.В., Тишин Д.В., Иванова А.Д., Шнепп А.В. Эволюция системы Глубоких озёр г. Казани в XX–XXI вв. // *Российский журнал прикладной экологии*. 2015. № 1. С. 31–38.
7. Иванов Д.В. Параметры осадконакопления в озёрах системы Кабан г. Казани // *Российский журнал прикладной экологии*. 2015. № 2. С. 20–25.
8. Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Осмелкин Е.В. Оценка скорости осадконакопления в озёрах Казани и Приказанья // *Георесурсы*. 2011. № 2 (38). С. 46–48.
9. Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р., Зиганшин И.И., Осмелкин Е.В. Взаимосвязь вещественного состава озёрных отложений и антропогенного преобразования природных ландшафтов Республики Татарстан // *Экология и промышленность России*. 2011. № 6. С. 35–38.
10. Tracking environmental change using lake sediments. V. 1. Basin analysis, coring and chronological techniques. Dordrecht, Boston: Kluweracad. publ., 2002. 548 p.

1. Mörner N.-A. Varve chronology // *Geochronology Methods and Case Studies*. In Tech, 2014. 204 p.
2. Herman G.T. *Fundamentals of computerized tomography: Image reconstruction from projection*. 2nd edition. London: Springer, 2009. 435 p.
3. Galkin S.V., Yefimov A.A., Krivoshechekov S.N., Savitskiy Ya.V., Cherepanov S.S. X-ray tomography in petrophysical studies of core samples from oil and gas fields // *Geologiya i geofizika*. 2015. № 5. P. 995–1007 (in Russian).
4. Korost D.V., Khomyak A.N., Belokhin V.S., Gilyazetdinova D.R., Khlystov O.M., Akhmanov G.G. Late quaternary sediments of the lake Baikal: preliminary results of X-ray tomographic studies // *Morskiye issledovaniya i obrazovaniye: Sb. tez. III mezhdunar. konf. M., 2014. P. 118–120* (in Russian).
5. Gilyazetdinova D.R., Akhmanov G.G., Khlystov O.M., Abrosimov K.N. Peculiarities of composition and structure of mud volcanoes of the lake Baikal // *Morskiye issledovaniya i obrazovaniye: Sb. tez. III mezhdunar. konf. M., 2014. P. 39–40* (in Russian).
6. Ivanov D.V., Sonin G.V., Tishin D.V., Ivanova A.D., Shnepp A.V. Evolution of the Glubokoe lake system of Kazan City in XX–XXI century // *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2015. № 1. P. 31–38 (in Russian).
7. Ivanov D.V. Sedimentation in the Kaban lake system of Kazan city // *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2015. № 2. P. 20–25 (in Russian)
8. Ivanov D.V., Ziganshin I.I., Osmelkin Ye.V. Sedimentation rates evaluation of some lakes in Kazan and in Prikazansky region // *Georesursy*. 2011. № 2 (38). P. 46–48 (in Russian).
9. Ivanov D.V., Shagidullin R.R., Ziganshin I.I., Osmelkin Ye.V. The relationship of the material composition of lake sediments and anthropogenic transformation of the natural landscape of the Republic of Tatarstan // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2011. № 6. P. 35–38 (in Russian).
10. Tracking environmental change using lake sediments. V. 1. Basin analysis, coring and chronological techniques. Dordrecht, Boston: Kluweracad. publ., 2002. 548 p.