

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА ДЛЯ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КРУПНОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (НА ПРИМЕРЕ АРГАЗИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

А.В. Белобородов¹, А.В. Богомолов², А.П. Лепихин^{1,2}, Ю.С. Ляхин²

E-mail: gwynnlehh@mail.ru

¹ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

² «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ: Рассмотрено применение метода акустического профилирования донных отложений крупного водохранилища с использованием современных приборных средств. Подобные исследования эффективны при оценке объемов донных отложений и характера их залегания. Приведены примеры интерпретации профилеграмм при разных условиях залегания донных отложений.

Использование акустических профилографов в сочетании с контрольным отбором проб донных отложений без нарушения их вертикальной структуры (колонка) позволяет при минимальных затратах получить необходимый комплекс исходной информации для планирования дальнейших мероприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: акустическое профилирование, донные отложения, загрязняющие вещества, Аргазинское водохранилище.

Необходимость изучения мощности донных отложений водных объектов обусловлена, в целом, двумя обстоятельствами. Во-первых, гранулометрический состав отложений и их литология характеризуют динамическую обстановку осадконакопления по акватории водохранилища, дают ключ к более глубокому пониманию внутриводоемных процессов, особенно протекающих в наиболее трудном для непосредственного изучения придонном горизонте, их эволюции во времени, начиная с момента первоначального затопления ложа. Во-вторых, донные отложения являются объектами, аккумулирующими загрязняющие вещества, поступающие в водохранилище, с одной стороны, а с другой стороны, они могут выступать источниками вторичного загрязнения водной массы водохранилища при реализации неблагоприятных условий. Образно говоря, донные отложения являются геохимической памятью водного объекта.

©Белобородов А.В., Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., 2020

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – Аргазинское водохранилище. Водоем располагается в Аргаяшском муниципальном районе и Карабашском городском округе Челябинской области, на восточной границе Зауральского пенеплена гор Южного Урала и западной границе Западно-Сибирской равнины, в лесостепной зоне. Аргазинское водохранилище на р. Миасс построено в 1929 г. для питьевого и промышленного водоснабжения Челябинского промышленного района. В периоды с 1941 по 1946 гг. и с 1976 по 1982 гг. выполнялись работы по реконструкции гидроузла с повышением уровня НПУ водохранилища до 275,32 м БС. На момент обследования (2019 г.) отметка уровня воды составляла 273,14 м БС.

Аргазинское водохранилище расположено в зоне предгорий восточного склона Уральских гор, которая характеризуется грядово-холмистым характером и представлена невысокими горными хребтами, вытянутыми в меридиональном направлении и разделенными долиной р. Миасс (рис. 1). Западный берег водохранилища представляет собой типичный гористо-холмистый рельеф с абсолютными отметками 300–400 м. Южный и северный берега с мелко-холмистым рельефом – переходную зону между гористой и равнинной территориями. Восточный берег водохранилища носит черты мелкобугристой равнинной поверхности, сильно выположен, с абсолютными отметками поверхности 280–300 м. Берега водохранилища, за исключением восточного, сильно изрезаны, с многочисленными останцами коренных пород.

По результатам выполненных в 2019 г. промерных работ, объем водохранилища при отметке 273,14 м БС составлял 753 млн м³, площадь акватории при данной отметке – 105 км², длина водохранилища – 24,1 км, средняя ширина – 4,35 км, средняя глубина – 7,19 м, максимальная – 11,8 м.

Рассматриваемый водоем, как уже отмечалось, является ключевым элементом системы питьевого водоснабжения г. Челябинска, поэтому оценка мощности и состава донных отложений водохранилища представляют существенное значение для обеспечения устойчивости ее функционирования.

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ И ОБЪЕМА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Вопросы, касающиеся изучения строения, состава и распределения мощности донных отложений в водохранилищах различных размеров и озерах, достаточно широко освещены в научной литературе, например [1–4]. Проблемы изменения полезных объемов водохранилищ в результате аккумуляции донных отложений рассмотрены в [5]. Обзор современных вычислительных моделей динамики донных отложений представлен в [6].

Стандартная методика исследований сводится к точечному опробованию донных отложений различными по конструкции грунтовыми трубка-



Рис. 1. Расположение Аргазинского водохранилища.

Fig. 1. Location of the Argazino Reservoir.

ми и дночерпателями. Следует отметить определенные недостатки такого подхода. Во-первых, при значительных размерах водного объекта общее количество станций опробования может достигать десятков и даже сотен точек, что требует больших временных и ресурсных затрат (выставление на точку, якорение, спуско-подъемные операции и т. п.). Во-вторых, даже при значительном количестве точек исследования неизученным «белым пятном» остаются пространства между ними. При сложном донном рельефе, наличии погребенных русловых и пойменных форм это создает предпосылки для недоучета общего объема донных отложений, точное значение кото-

рого приобретает особую важность при планировании и расчете стоимости работ, например, при экологической реабилитации водного объекта.

Решить данные вопросы позволяют современные геофизические методы исследований, основанные на генерации сигналов определенной частоты и мощности, их последующей регистрации, обработки и интерпретации. Одним из таких методов является донное акустическое профилирование [7].

Акустическое (сейсмоакустическое) профилирование (sub-bottom profiling) как геофизический метод давно применяется в морской геофизике в вариантах буксируемого оборудования, что ранее было обусловлено техническими особенностями и габаритами аппаратуры [7]. Однако по мере технологического развития средств измерения в настоящее время получили распространение набортные варианты размещения оборудования, отличающиеся простотой и компактностью установки и соответствующим возможностям небольших моторных судов малым энергопотреблением (рис. 2).



Рис. 2. Маломерное исследовательское судно, оборудованное для выполнения промерных работ, акустического профилирования и отбора проб донных отложений (а); набортное использование профилографа с приемником GPS-ГЛОНАСС (б).

Fig. 2. Small-dimension research vessel equipped for gauging, acoustic profiling and sampling of bottom sediments (a); on-board use of the profilograph with GPS-GLONASS receiver (b).

Донные профилографы представляют, по сути, однолучевые эхолоты, работающие на очень низкой частоте (первые килогерцы). Проникающая способность генерируемых волн зависит от частоты сигнала (скин-эффект) и его длительности [7–9]. Приборы с более низкой частотой антенного блока позволяют выполнять исследования на большую глубину, однако при этом снижается разрешающая способность прибора. Использование технологии CHIRP (линейной частотной модуляции сигнала) позволяет увеличить производительность системы и обеспечить большее разрешение по разрезу дна.

В отличие от метода георадиолокации, также достаточно широко применяемого для обследования дна водных объектов, акустическое профилирование изначально предназначалось для исследования строения дна водных объектов, главным образом, для поиска месторождений газогидратов на шельфе морей.

В данной работе применен донный профилограф StrataboxHD (SyQwest, США), работающий на частоте 10 кГц, позволяющий выполнять исследования на глубину осадочной толщи до 40 м при глубине водоема до 150 м с максимальным разрешением 6–10 см. Точность исследований составляет 0,5 %. Вес прибора вместе с излучателем порядка 3 кг.

Преимущества применения донного профилографа при исследовании донных отложений заключаются в возможности проведения непрерывных площадных исследований строения и мощности донных осадков водных объектов при высокой разрешающей способности получаемых профилограмм. Результаты исследований позволяют провести классификацию донных отложений на основании базы данных акустических характеристик.

Использование донных профилографов не отменяет применение традиционных пробоотборников, поскольку, как и для любого геофизического метода, интерпретация данных акустического профилирования требует «привязки» к конкретным физическим слоям осадков. Однако профилографы позволяют сокращать количество точек исследования в разы, при этом закрывая «белые пятна» между станциями отбора проб. Теоретически возможности аппаратуры позволяют получать непрерывный профиль любой длины. Например, при работе на Аргазинском водохранилище максимальная длина непрерывного профиля донных отложений составляла 17 км, средняя – порядка 5–7 км (рис. 3). Однако для удобства обработки данных, как показали проведенные исследования, можно ограничиваться длиной профиля не более 8–10 км.



Рис. 3. Пример профилограммы донных отложений, длина профиля порядка 800 м (хорошо видно слоистое строение осадочной толщи донных отложений в озерной части водохранилища).

Fig. 3. An example of the bottom sediments profilogram, the profile length of 800 m order (good sight of the layer structure of the bottom sediments column in the lacustrine part of the reservoir).

Координатная привязка профилограмм осуществлялась автоматически в процессе съемки с помощью GPS-ГЛОНАСС-приемника. Обработка данных проведена в специализированных программных средах StrataboxHD, SonarWiz и HyPack встроенными методами уменьшения соотношения шум/полезный сигнал с применением частотной фильтрации [10–12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате обработки материалов, полученных при использовании донного профилографа StrataboxHD, построены схемы распределения мощности донных отложений (рис. 4). Общая направленность процесса осадконакопления характеризуется аккумуляцией донных отложений в понижениях, на выровненных участках дна. Большую роль при этом играют глубина и скорость течения. В целом мощность донных отложений увеличивается при увеличении глубины, однако наличие компенсационных течений в водохранилище, а также на участках влияния придонных и стоковых течений приводит к тому, что в пределах затопленной русловой ложбины происходит перенос и переотложение донных осадков с их частичным или полным размывом в зависимости от скорости течения.

В верховьях Аргазинского водохранилища у группы островов отмечается локальное увеличение мощности донных отложений вследствие удержания потока наносов и его отклонения к правому берегу. Острова и окаймляющая их мелководная зона выступают в роли своеобразных «экранов», механического барьера, на котором происходит осаждение наносов в результате уменьшения скоростей течения и снижения воздействия ветрового волнения.

Проведенные исследования позволили определить объем донных отложений водохранилища и характер их размещения по акватории водоема. Общий объем донных отложений составляет около 87 млн м³.

Условия залегания донных отложений

В целом для Аргазинского водохранилища характерно достаточно простое слоистое строение осадочной толщи, включающей в верхней части современные донные осадки (рис. 5). На большей части нижнего и среднего районов водохранилища отмечается сплошное распространение илов (рис. 6).

Первоначальный предгорный останцовый рельеф озерной котловины Аргазинского водохранилища по результатам интерпретации акустического профилирования прослеживается на дне водохранилища в виде погребенных в толще осадков каменных останцов, представляющих продукт разрушения материнских горных пород скального массива по берегам затопленного озера (рис. 7).

Как отмечалось ранее, на возвышенных частях подводного рельефа наблюдается локальное уменьшение мощности донных отложений (рис. 8).

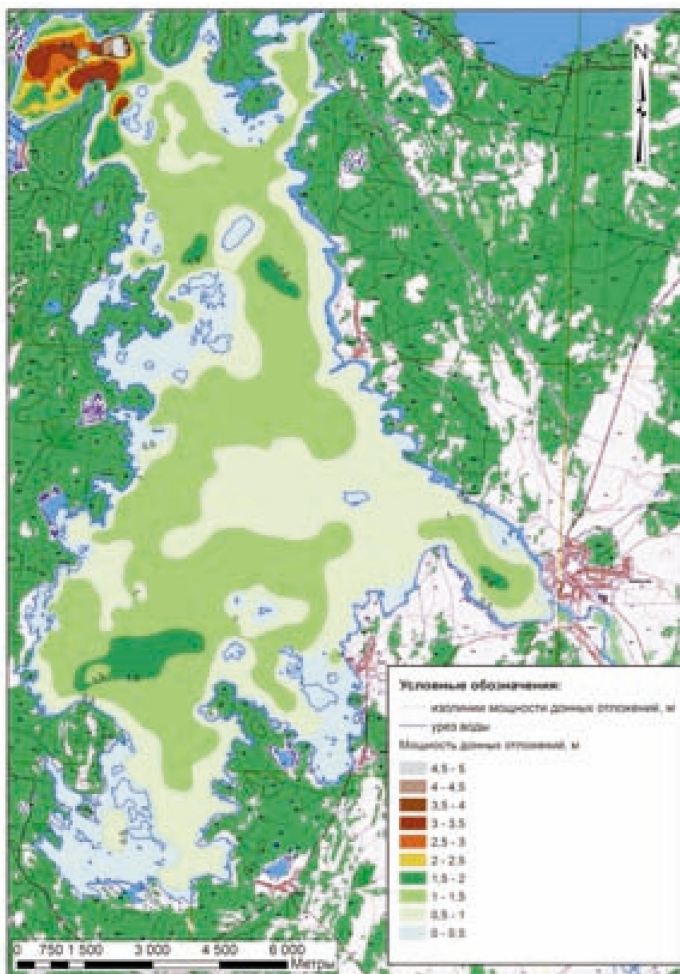


Рис. 4. Схема распределения мощности донных отложений Аргазинского водохранилища по материалам акустического профилирования.

Fig. 4. The scheme of the Argazin Reservoir bottom sediments strength distribution according the acoustic profiling data.

Пример интерпретации границ донных отложений по данным зондирования представлен на рис. 9. Желтыми линиями показаны четко выделяемые границы между различными слоями (сверху вниз): ил, торф, пески пылеватые и залегающие ниже коренные породы.

Лабораторными исследованиями отобранных проб донных отложений установлено, что они представлены пылеватыми песками, глинистым и песчанистым илом и разложившимся торфом.

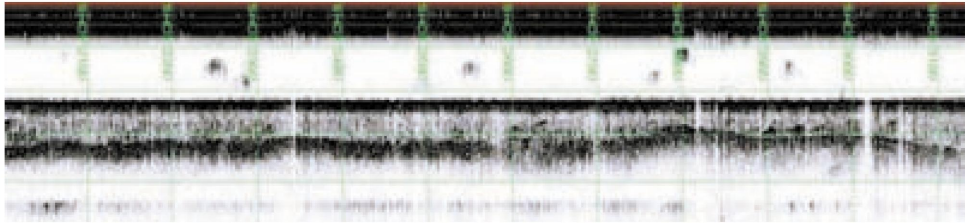


Рис. 5. Условия залегания донных отложений на подводной части склона и в центральной части водохранилища: горизонтальные линии проведены через 5 м.
Fig. 5. The conditions of the bottom sediments location in the underwater part of the slope and in the central part of the reservoir: horizontal lines with the 5 m interval.

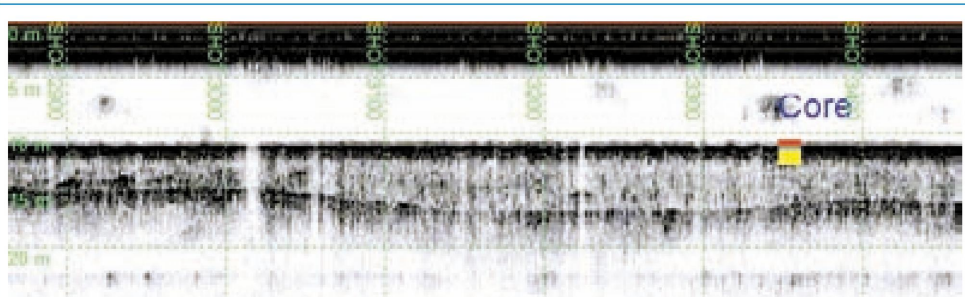


Рис. 6. Сплошное распространение илов в центральной части водохранилища: core – положение точки опробования грунтовой трубкой; цветные слои сверху вниз – ил, торф и подстилающий слой озерно-аллювиальных песков; горизонтальные линии проведены через 5 м.
Fig. 6. The silts continuous distribution in the reservoir central part; core is the location of the ground pipe sampling point; colored layers downword are silt, peat and underlying layer of lacustrine/alluvial sands; horizontal lines with the 5 m interval.

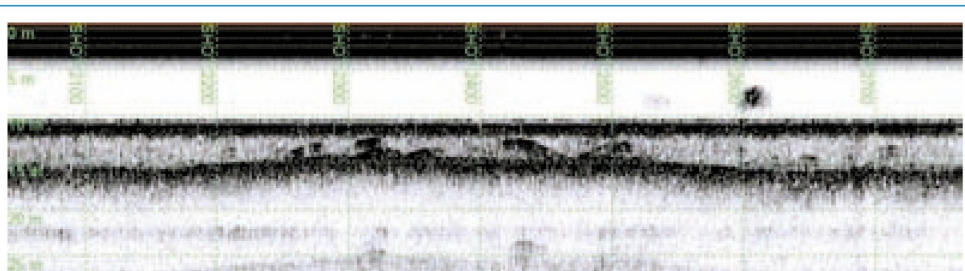


Рис. 7. Погребенные в толще озерно-аллювиальных осадков каменные останцы начального рельефа: центральная часть водохранилища, горизонтальные линии проведены через 5 м.
Fig. 7. The initial relief stone outliers buried within the thickness of lacustrine/alluvial sediments: the reservoir central part, horizontal lines with the 5 m interval.

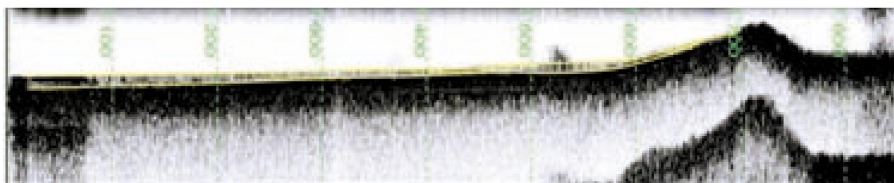


Рис. 8. Соотношение мощности донных отложений на выровненной поверхности ложа водохранилища и на затопленном возвышении: желтая линия – поверхность донных отложений, центральная часть водохранилища; горизонтальные линии проведены через 5 м.

Fig.8. Relation between the bottom sediments thickness on the flatted surface of the reservoir bed and on the water covered elevation: a yellow line is the surface of bottom sediments; the reservoir central part, horizontal lines with the 5 m interval.

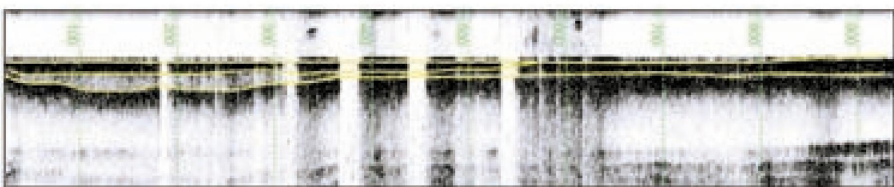


Рис. 9. Строение слоистой толщи донных отложений центральной части водохранилища: желтые линии – границы различных типов отложений.

Fig. 9. The structure of the reservoir central part bottom sediments laminated thickness: yellow lines are boundaries of the different types of sediments.

Повышенные значения мощности донных отложений отмечаются в центральной части водохранилища, а также в пределах затопленного русла. Минимальные мощности донных отложений фиксируются на подводных частях аккумулятивных отмелей в зоне максимального ветро-волнового воздействия, а также в пределах положительных подводных форм рельефа (затопленные скалы-останцы). В литолого-стратиграфическом отношении для донных отложений можно выделить следующие типы разрезов (рис. 10):

Тип 1 – песок пылеватый с примесью органического вещества (неполный тип разреза), характерен для верхней части водохранилища, отражает динамические условия накопления осадка на входном створе, основной источник отложений – взвешенные и влекомые наносы. Отсутствие в разрезе илов характеризует гидродинамическую активность водоема на этом участке. Этому типу разреза соответствуют максимальные мощности отложений в зоне своеобразной «авандельты выдвигения» реки.

Тип 2 – ил, торф, песок (полный тип разреза), отражает начальное строение территории до затопления и последующую динамику накопления тон-

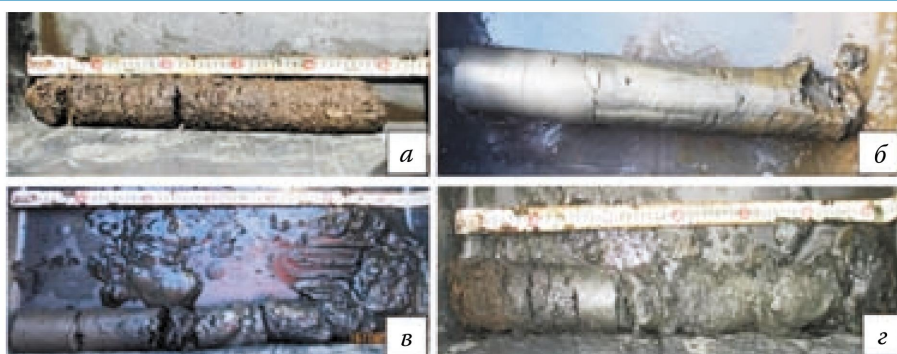


Рис. 10. Виды донных отложений водохранилища: *а* – торф,
б – песок пылеватый, *в, з* – переходные типы.

Fig. 10. Types of the reservoir bottom sediments: *a* – peat, *б* – dust-like sand,
в, з – transition types.

кодисперсного осадка на аллювиальных песках и первичных торфах приозерной территории и низкой поймы реки.

Тип 3 и тип 4 – комбинации ил-песок, ил-торф (неполный тип разреза), отражают как начальные условия накопления тонкодисперсных иловых осадков на первичных грунтах, так и фиксирующие динамические обстановки накопления и переформирования донных отложений.

ВЫВОДЫ

Применение современных геофизических методов, основанных на использовании акустического профилографа, позволяет существенно повысить эффективность и детальность работ при определении разновидностей и мощности донных отложений крупных водохранилищ.

На примере Аргазинского водохранилища продемонстрированы возможности использования современных геофизических средств для исследования донных отложений. Проведенные исследования позволили определить как объем донных отложений водохранилища, так и их распределение по акватории водоема. Общий объем донных отложений Аргазинского водохранилища составляет около 87 млн м³. Для удобства практического использования полученных результатов построена картосхема распределения мощности донных отложений по акватории данного водного объекта.

Развитие представленного в статье метода видится весьма перспективным как с научной, так и с практической точек зрения. Основным направлением дальнейших исследований является отработка методов распознавания и классификации донных отложений на глубину по характеристике отраженного сигнала [10, 13], что позволит вывести исследования грунтового комплекса крупных водохранилищ на новый уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада: автореф. дисс. ... д-ра геогр. наук. М., 2007. 52 с.
2. Кузнецова Л.А. Заиление камских водохранилищ // Комплексные исследования гидрологии и водной экологии камских водохранилищ и рек их водосборов. Межвуз. сб. научн. трудов. Пермь: Изд-во ПГУ, 1987. С. 38–49.
3. Субетто Д.А., Прыткова М.Я. Донные отложения разнотипных водоемов. Методы изучения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. 89 с.
4. Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л., 1975. 159 с.
5. Белобородов А.В. Изменение морфометрических параметров крупных равнинных водохранилищ: причины и последствия (на примере Камского водохранилища) // Водное хозяйство России. 2019. №4. С. 72–92. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-4.
6. Лепихин А.П., Тиунов А.А. Современные гидродинамические модели русловых процессов // Водное хозяйство России. 2019. № 4. С. 114–143. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-6.
7. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.А. Сейсмоакустические исследования на акваториях. М.: Недра, 1983. 204 с.
8. Dunbar John A., Allen Peter M., Higley Paul D. Color-encoding multifrequency acoustic data for near-bottom studies // Geophysics. Vol. 65. No. 3. P. 994–1002.
9. Dunbar John A., Allen Peter M., Higley Paul D., Bennett Sean J. Acoustic sub-bottom profiling surveys of flood control reservoirs. // Environmental & Engineering Geoscience. Vol. XIX. No. 2. P. 135–148.
10. Penrose J.D., Siwabessy P.J.W., Gavrilov A. et al. Acoustic techniques for seabed classification // Cooperative Research Centre for Coastal Zone Estuary and Waterway Management. Technical Report 32 (September 2005). 141 p.
11. Lafferty B., Quinn R., Breen C. A side-scan sonar and high-resolution Chirp sub-bottom profile study of the natural and anthropogenic sedimentary record of Lower Lough Erne, northwestern Ireland // Journal of Archaeological Science. 2006. No. 33. P. 756–766.
12. Ostrowski R., Pruszek Z. Relationships between coastal processes and properties of the nearshore sea bed dynamic layer // Oceanologia. 2011. No. 53(3). P. 861–880.
13. Jakubauskas M., deNoyelles F. Method for assessing sedimentation in reservoir / Sedimentation in our reservoir: causes and solutions. KansasStateUniversity, 2008. P. 25–35.

Для цитирования: Белобородов А.В., Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С. Опыт применения гидроакустического профилографа для оценки мощности донных отложений крупного водохранилища (на примере Аргазинского водохранилища) // Водное хозяйство России. 2020. № 3. С. 6–18.

Сведения об авторах:

Белобородов Александр Валерьевич, ведущий инженер-исследователь, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и

охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; e-mail: gwynnlehh@mail.ru

Богомолов Андрей Владимирович, канд. техн. наук, научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: whitewing85@mail.ru

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: lepin49@mail.ru

Ляхин Юрий Сергеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: ljahin85@mail.ru

**EXPERIENCE OF APPLICATION OF HYDROACOUSTIC PROFILOGRAPH
FOR ESTIMATION OF BOTTOM SEDIMENTS OF LARGE RESERVOIR
(THE ARGAZIN RESERVOIR AS A STUDY CASE)**

Alexander V. Beloborodov, Andrey V. Bogomolov, Anatoliy P. Lepikhin, Yuriy S. Lyakhin
E-mail: gwynnlehh@mail.ru

¹ *Russian Research Institute for Integrated of Water Management and Protection, Kama Branch*

² *Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

Abstract: The work considers application of the method of sub-bottom profiling of bottom sediments of a large reservoir with the use of modern instruments. Such studies are effective in assessing the volume of bottom sediments and the nature of their occurrence.

The use of acoustic profilographers in combination with control sampling of bottom sediments without disruption of their vertical structure (column) enables to obtain at minimum costs the necessary set of initial information for planning of further measures.

Key words: large reservoir, sub-bottom profiling, bottom sediments capacity, bottom sediments structure.

About the authors:

Alexander V. Beloborodov, Leading Research Engineer, Russian Research Institute for Integrated of Water Management and Protection, Kama Branch (KamNIIVKh), ul. Nikolaya Ostrovskogo, 133, Perm, 614002, Russia; e-mail: gwynnlehh@mail.ru

Andrey V. Bogomolov, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Problems of Land Hydrology, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: whitewing85@mail.ru

Anatoliy P. Lepikhin, Doctor of Geography, Professor, Director, Russian Research Institute for Integrated of Water Management and Protection, Kamsky Branch (KamNIIVKh), ul. Nikolaya Ostrovskogo, 133, Perm, 614002, Russia; Head of the Laboratory of Problems of Land Hydrology, Mining institute of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; e-mail: lepin49@mail.ru

Yuriy S. Lyakhin, Candidate of Technical Sciences, the research associate of laboratory of problems of Land Hydrology, Mining institute of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; e-mail: ljahin85@mail.ru

For citation: Beloborodov A.V., Bogomolov A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin Y.S. *Experience of Application of Hydro/acoustic Profilograph for Estimation of Bottom Sediments of Large Reservoirs (the Argazin Reservoir as a Study Case)* // *Water Sector of Russia*. 2020. № 3. P. 6–18.

REFERENCES

1. Zakonnov V.V. Osadkoobrazovaniye v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada [Sediments formation in the Volga cascade reservoirs]: avtoref. diss. ...d-ra geogr. nauk. M., 2007. 52 p.
2. Kuznetsova L.A. Zaileniye kamskikh vodokhranilishch [The Kama River reservoirs silting] // Kompleksniye issledovaniya gidrologiyi i vodnoy ekologiyi kamskikh vodokhranilishch i fer ikh vodosborov. Mezhd. sb. nauchn. trudov. Perm: Izd-vo PGU, 1987. P. 38–49.
3. Subetto D.A., Prytkova M.Y. Doniye otlozheniya raznotipnykh vodoyomov. Metody izucheniya [Bottom sediments of the the different type water bodies. Research methods]. Petrozavodsk: Karelskiy nauchniy tsentr RAN, 2016. 89 p.
4. Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. Verkhnevolzhskikh vodokhranilishch [Bottom sediments of the Upper Volga reservoirs]. L., 1975. 159 p.
5. Beloborodov A.V. Izmeneniye morfometricheskikh parametrov krupnykh ravninnykh vodokhranilishch: prichiny i posledstviya (no primere Kamskogo vodokhranilishcha) [Changing of the big plain reservoirs' morphometric parameters: causes and consequences (the Kama reservoir as a study case)] // *Water Sector of Russia*. 2019. №4. P. 72–92. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-4.
6. Lepikhin A.P., Tiunov A.A. Sovremeniye gidrodinamicheskiye modeli ruslovykh protsessov [Modern hydrodynamic models of the channel processes] // *Water Sector of Russia*. 2019. № 4. P. 114–143. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-4-6.
7. Kalinin A.V., Kalinin V.V., Pivovarov B.L. Seismoakusticheskiye issledovaniya na akvatoriakh [Seismoacoustic researches at water areas]. M.: Nedra, 1983. 204 p.
8. Dunbar John A., Allen Peter M., Higley Paul D. Color-encoding multifrequency acoustic data for near-bottom studies // *Geophysics*. Vol. 65. No. 3. P. 994–1002.
9. Dunbar John A., Allen Peter M., Higley Paul D., Benett Sean J. Acoustic sub-bottom profiling surveys of flood control reservoirs // *Environmental & Engineering Geoscience*. Vol. XIX. No. 2. P. 135–148.
10. Penrose J.D., Siwabessy P.J.W., Gavrilov A. *et al.* Acoustic techniques for seabed classification // Cooperative Research Centre for Coastal Zone Estuary and Waterway Management. Technical Report 32 (September 2005). 141 p.
11. Lafferty B., Quinn R., Breen C. A side-scan sonar and high-resolution Chirp sub-bottom profile study of the natural and anthropogenic sedimentary record of Lower Lough Erne, northwestern Ireland // *Journal of Archaeological Science*. 2006. No. 33. P. 756–766.
12. Ostrowski R., Pruszk Z. Relationships between coastal processes and properties of the nearshore sea bed dynamic layer // *Oceanologia*. 2011. No. 53(3). P. 861–880.
13. Jakubauskas M., deNoyelles F. Method for assessing sedimentation in reservoir / Sedimentation in our reservoir: causes and solutions. KansasStateUniversity, 2008. P. 25–35.