

УДК 552.143/556.552.2(282.256.342.347)

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-271-279

Скорость осадконакопления и физические свойства донных осадков в Ангарских водохранилищах в условиях цикличности уровня режима

Г. А. Карнаухова

Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: karnauh@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 07.11.2018 г., принята к печати 14.01.2019 г.

Объект исследований. В статье представлены результаты исследования скорости осадконакопления и физических свойств донных осадков в Ангарских водохранилищах при управляемом уровне режиме. **Материалы и методы.** В основу работы положены материалы экспедиционных работ, проведенных автором на Ангарских водохранилищах в 1972–2017 гг., и анализ материалов, опубликованных в открытой печати. Определение физических свойств и гранулометрического состава донных осадков выполнено классическими в инженерной геологии методами. **Результаты.** Установлено, что управляемый уровень режим определяет временные циклы осадконакопления в водохранилищах, источники поступления осадкообразующего материала, скорость осадконакопления и неоднозначность физических свойств донных осадков. **Заключение.** Во время трансгрессий в водохранилищах наиболее интенсивно накапливаются пески, крупные алевроиты и мелкоалевритовые илы, при регрессиях – крупные алевроиты и алевроитово-глинистые илы. При трансгрессии все типы осадков имеют наиболее высокие показатели плотности осадка и скелета осадка, емкости поглощения, а крупные алевроиты и мелкоалевритовые илы – высокую природную влажность. Кроме того, крупные алевроиты характеризуются высокой пористостью, а мелкоалевритовые и алевроитово-глинистые илы – повышенным содержанием органического вещества. Во время регрессий увеличивается пористость у песков, мелкоалевритовых и алевроитово-глинистых илов, возрастает содержание органического вещества в песках и крупных алевроитах, все типы осадков становятся более насыщенными карбонатами.

Ключевые слова: Ангарские водохранилища, скорость осадконакопления, физические свойства осадков, управляемый уровень режим

Благодарность

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00194, 14-05-00079, 18-05-00101).

Sedimentation rate and physical properties of bottom sediments in the Angara reservoirs under the cyclical conditions of the level regime

Galina A. Karnaukhova

Institute of the Earth crust SB RAS, 128 Lermontov st., Irkutsk 664033, Russia, e-mail: karnauh@crust.irk.ru

Received 07.11.2018, accepted 14.01.2019

Research subject. The article presents the results of a study of sedimentation rate and physical properties of bottom sediments in the Angara reservoirs under controlled level regimes. **Materials and methods.** The work was based on the materials of fieldwork carried out by the author on the Angara reservoirs in 1972–2017 and open-access literature sources. The physical properties and particle size distribution of bottom sediments were determined by the standard methods of engineering geology. **Results.** It was found that the controlled level regime determines the time cycles of sedimentation in reservoirs, sources of sediment-forming material, sedimentation rate and ambiguity of the physical properties of bottom sediments. **Conclusions.** During transgressions, sands, coarse aleurites and fine-aleurite silts accumulate in reservoirs most intensively; however, during regressions, coarse aleurites and aleurite-clayey silts are accumulated. During transgressions, all types of sediments are characterised by the highest sediment density, sediment skeleton density and absorption capacity, while coarse aleurites and fine-aleurite silts exhibit high natural humidity levels. In addition, coarse aleurites are characterised by a high porosity, while fine-aleurite and aleurite-clayey silts are characterised by a

Для цитирования: Карнаухова Г.А. (2020) Скорость осадконакопления и физические свойства донных осадков в Ангарских водохранилищах в условиях цикличности уровня режима. *Литосфера*, 20(2), 271–279. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-271-279

For citation: Karnaukhova G.A. (2020) Sedimentation rate and physical properties of bottom sediments in the Angara reservoirs under the cyclical conditions of the level regime. *Litosfera*, 20(2), 271–279. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-271-279

© Г.А. Карнаухова, 2020

high content of organic matter. During regressions, the porosity of sands, fine-aleurite and aleurite-clayey silts increases, the content of organic matter in sands and coarse aleurites increases, and all types of sediments become more saturated with carbonates.

Keywords: *Angara reservoirs, sedimentation rate, physical properties of sediments, controlled level regime*

Acknowledgments

The studies were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 11-05-00194, 14-05-00079, 18-05-00101).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время скорость современного осадконакопления определяется как отношение видимой мощности осадка ко времени его накопления (Холодов, 1997). Возможности достоверных численных определений скоростей осадконакопления во многих случаях ограничены, поэтому и оценки их носят лишь приблизительный или качественный характер (Байков, Седлецкий, 2005). Наиболее перспективным для получения информации о темпах осадконакопления и временных изменениях их состава и физических свойств представляется использование в качестве моделей современных искусственных водоемов – водохранилищ, в которых все процессы происходят в режиме реального времени и во много раз быстрее, чем в природных водоемах, что позволяет проводить непосредственные наблюдения.

Одной из наиболее рациональных моделей исследований являются Ангарские водохранилища, представляющие собой природно-техногенный объект с современным быстрым и сверхбыстрым осадконакоплением, в котором наблюдения за скоростью осадконакопления и динамике физических свойств донных осадков дают информацию о природных особенностях водосбора, характере регулирования и направленности антропогенного воздействия.

Зарегулировав сток Ангары, вытекающей из оз. Байкал, Ангарские водохранилища стали одной из крупнейших в мире систем искусственных водоемов, представленной Иркутским, Братским, Усть-Илимским и Богучанским водохранилищами. В эксплуатации Иркутское водохранилище находится с 1957 г., Братское – с 1967 г., Усть-Илимское – с 1977 г. Богучанское водохранилище, наполнение которого произошло только в 2015 г., нами не рассматривается. Эксплуатация водохранилищ происходит в условиях управляемого уровня режима в соответствии с “Основными правилами использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС” (1988). Общая площадь, попавшая в зону затопления Иркутским, Братским и Усть-Илимским водохранилищами, составила 7500 км², протяженность с юга на север – около 1.4 тыс. км, в водохранилищах заключено 235 км³ воды. Водо-

хранилища располагаются на контакте двух геологических структур – Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны, литогенная основа которых весьма сложная, ее составляющими являются осадочные образования палеозоя, мезозоя и кайнозоя Сибирской платформы, а также нижнепротерозойские и архейские интрузивные образования Байкальской рифтовой зоны.

В задачу данной работы входило изучение скорости осадконакопления и динамики физических свойств донных осадков Ангарских водохранилищ на основе фиксации их временных циклов в условиях управляемого уровня режима.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Уровенный режим

За период эксплуатации водохранилищ в положении их уровней нами выделено 4 цикла. Каждый цикл начинается с трансгрессии и заканчивается с окончанием регрессии (Karnaukhova, 2016). Трансгрессия каждого цикла характеризуется стоянием высоких уровней воды в водохранилищах – на отметках НПУ (нормальный подпорный уровень) или близких к нему. Сработка уровня ниже на 1–7 м от НПУ характеризует регрессию (рис. 1).

Первый цикл продолжительностью 16 лет пришелся на 1967–1982 гг. Длительность трансгрессии составила 8 лет и совпала с многоводным периодом в бассейне оз. Байкал и р. Ангары. Уровень водохранилищ достигал отметок, близких к НПУ. Затем в бассейне водохранилищ наступил маловодный период, способствовавший недостаточному их наполнению и проявлению регрессии. В результате Иркутское и Братское водохранилища эксплуатировались при низких и очень низких уровнях воды.

Второй цикл пришелся на период с 1983 г. по 1992 г., который был весьма благоприятным для высокой водности оз. Байкал и в первые годы цикла относительно позитивным для Ангарских водохранилищ. Несмотря на повышенную водность оз. Байкал, продолжалась сработка запасов воды водохранилищ из-за необходимости увеличения выработки электроэнергии, передаваемой в Красноярский край, особенно высокой она была для Братского водохранилища.

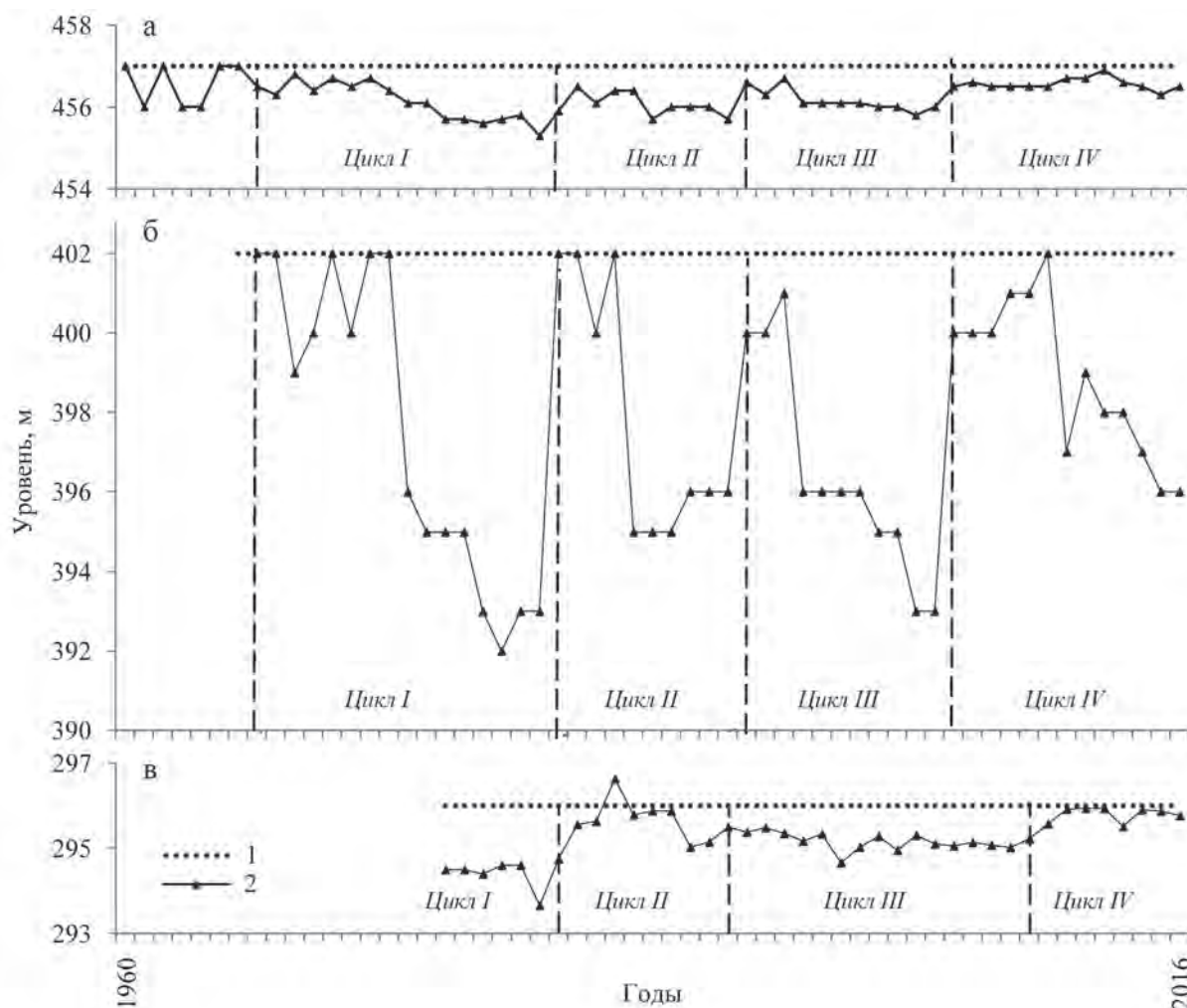


Рис. 1. Ход уровней воды в Ангарских водохранилищах за период эксплуатации.

Водохранилища: а – Иркутское, б – Братское, в – Усть-Илимское.
1 – НПУ (нормальный подпорный уровень), 2 – ход уровня.

Fig. 1. The course of water levels in the Angarsk reservoirs over the period of operation.

Reservoirs: а – Irkutsk, б – Bratsk, в – Ust'-Ilimsk.
1 – NRL (normal retaining level), 2 – level move.

Третий цикл длился в течение 1993–2003 гг. на Иркутском и Братском водохранилищах и с 1992 по 2008 гг. – на Усть-Илимском. Период трансгрессии с относительно высокими отметками уровней воды в этом цикле составил 3 года (1993–1995 гг.). Однако низкий показатель приточности рек, впадающих в водохранилища, из-за маловодья в их бассейнах способствовал стоянию уровня на отметках ниже НПУ.

Четвертый цикл начался с 2004 г. и стал однофазным, относительно благоприятным по водности, для Иркутского и Усть-Илимского водохранилищ за счет сработки оз. Байкал. Для Братского же водохранилища характерной явилась регрессия длительностью 7 лет при сработке уровня на

3 м ниже НПУ. Одной из причин явилась необходимость заполнения и выхода на отметку НПУ Богучанского водохранилища – четвертого в Ангарском каскаде.

Источники питания водохранилищ осадочным материалом

Обеспечивая регулирование водного стока путем накопления воды, водохранилища одновременно определяют величину поступающего осадкообразующего материала и его распределение по дну водоемов.

При трансгрессиях основным источником осадкообразующего материала в Ангарских водохрани-

лищах являются абразионные берега. Протяженность береговой линии Ангарских водохранилищ составляет около 8 тыс. км, из них около 30% приходится на абразионные берега. Ежегодно в результате размыва берегов в водохранилища поступает более 224 млн т абразионного материала, или 98% от суммарного поступления. В питании осадкообразующим материалом доля абразионного материала составляет в Иркутском водохранилище 77.9, в Братском – 98.8, в Усть-Илимском – 87.1%. Формирование берегов водохранилищ происходит в породах докембрия, палеозоя, мезозоя и кайнозоя. Наиболее размываемы сильно выветрелые и слабо противостоящие морозному воздействию различные палеозой-мезозойские глинистые и песчанниковые породы, а также четвертичные отложения, особенно делювиальные лессовидные суглинки, обладающие высокой степенью просадочности. Так, абразия четвертичных отложений ежегодно дает более 204.3 млн т, размыв пород ордовика – более 13.1 млн т, пород кембрия – более 4 млн т, песчанников и аргиллитов силура и карбона – около 2.4 млн т. Минимально поступление материала при абразии песчанников юры – около 0.23 млн т (Карнаухова, Сквитина, 2013; Карнаухова, 2014).

Непосредственно на осадконакопление приходится ежегодно 179.3 млн т, в том числе в прибрежной части акватории водохранилищ 132.8 млн т (65%), где абразионный материал создает аккумулятивные призмы, в которых величина ежегодно отлагающегося слоя песков составляет 18–89, крупных алевритов – 28–500 (мм/год). Осадконакопление в глубоководной части составляет 46.5 млн т ежегодно.

С началом *регрессии* при стоянии низких уровней абразия берегов водохранилищ прекращается. Происходит размыв и углубление прибрежных отмелей, сформированных при стоянии высоких уровней воды. Размывы отмелей происходят подобно развитию берегов по абразионному типу в периоды трансгрессий. Объемы размыва находятся в зависимости от состава материала, слагающего отмель, и степени гидродинамической активности. На прибрежных отмелях, сложенных при трансгрессии песками, происходит перемыв, растекание и нивелирование рельефа дна песчаным материалом. Наибольшие размывы приходятся на отмели, сложенные крупными алевритами, они составляют около 66% от всего объема размыва. Перемещение размываемого материала осуществляется в основном в виде разжиженных потоков. Новые отмели формируются уже на более низких батиметрических отметках, создавая благоприятные условия для активизации абразионных процессов береговых склонов при следующем стоянии высокого уровня воды в водохранилищах.

В результате смены питающего источника при регрессии происходит сокращение поступления

материала в водохранилища в среднем до 165.8 млн т/год, что составляет 74% от суммы поступления при трансгрессии. Из этой величины непосредственно на осадконакопление идет 132.8 млн т ежегодно, остальное – переходит в водную толщу.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные данные основаны на наблюдениях автора, проводившихся в периоды стояния как высоких (трансгрессии), так и низких (регрессии) уровней воды в водохранилищах, связанных как заданным режимом эксплуатации, так и минимумами водности в регионе. В качестве исходных послужили материалы экспедиционных работ, проведенных автором на Иркутском, Братском и Усть-Илимском водохранилищах в 1972–2017 гг., а также материалы из открытых источников. Экспедиционные исследования были комплексными и представляли ежегодные наблюдения в период открытой воды за формированием берегов и комплексом донных отложений водохранилищ на наиболее репрезентативных участках. На каждом таком участке вдоль берега были проложены по несколько теодолитных ходов, закрепленных деревянными или металлическими пикетами. С пикетов проводились мензульная и теодолитная съемки, по материалам которых составлялись топографические планы с нанесением линий бровки и подножия берегового уступа, уреза и прилегающей части отмели, что позволяло определить величину отступления бровки и объемы размываемого материала. От пикетов теодолитного хода по нормали к берегу проложены профили, по которым ежегодно проводилось техническое нивелирование пляжа и осушенной отмели. Продолжением нивелирных профилей являлись промерные профили протяженностью 100–150 м, по которым с помощью гидрологической лебедки с лодки измерялись глубины через каждый метр. Промерно-нивелировочные работы по профилям, с отбором образцов наносов с отмели в подводной и надводной ее частях, позволяли исследовать динамику наносов на отмелях водохранилищ (Овчинников, Карнаухова, 1985; Карнаухова, 1998). За пределами же прибрежных отмелей проводился отбор образцов донных отложений с борта НИСа грунтоотборной трубкой, для работы на малых глубинах были задействованы грунтоотборники различных модификаций и дночерпатель. Точки по профилю располагались через 250–500, реже – 1000 м, местоположение профилей и точек опробования определялось по прокладке курса экспедиционного судна. Такой метод позволил включить в систему опробования большинство форм подводного рельефа и обстановок осадконакопления. После отбора проводилось подробное послойное описание текстуры, структуры, цвета, консистенции осадков, а также измерение мощности слоя накопившихся осад-

ков. Одновременно с описанием отбирались образцы из колонки с помощью режущего кольца и помещались в бюксы для последующего определения физических свойств донных отложений. Оставшаяся часть образца упаковывалась в пищевой полиэтиленовый пакет для дальнейшей обработки в стационарных условиях.

На основе данных прямых измерений мощности осадочного слоя при многократных детальном грунтовых съемках, в пределах выбранных временных интервалов для различных типов осадков, нами были определены скорости осадконакопления в условиях непрерывной седиментации и при существовании размыва части осадков. Расчеты выполнены по методике, предложенной в работе (Байков, Седлецкий, 2005).

Для анализа режима уровней Ангарских водохранилищ за период их эксплуатации (1967–2017 гг.) были использованы следующие открытые источники: материалы многолетних режимных наблюдений ФГБУ “Иркутское УГМС”. ЦГМС (Технический проект, 1951; Ежегодные данные..., 1980–1986; Многолетние данные..., 1987; Государственный доклад..., 2017); информация, представленная на сервисах: <http://m.allrivers.info>; <http://vk.com/allriversinfo>; http://sputnik.irk.ru/alt/baikal_level/html/201501.html; <http://gis.vodinfo.ru/informer/>

В ЦКП ИЗК СО РАН “Геодинамика и геохронология” выполнено определение гранулометрического состава донных осадков классическими в инженерной геологии ситовым, Сабанина, пипеточным и комбинированным методами. При анализе показателей физических свойств донных осадков были использованы только образцы с ненарушенной структурой. Определялись абсолютная влажность осадков в естественном залегании, пористость и коэффициент пористости, плотность осадка и плотность скелета осадка при естественном сложении, содержание органического вещества и карбонатов, емкость поглощения. Работы выполнялись по существующим методикам (Ломтадзе, 1972, 1990; Гроссгейм и др., 1984; Логвиненко, Сергеева, 1986).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Управляемый уровеньный режим за период эксплуатации Ангарских водохранилищ привел к неравномерности поступления и скоростей накопления осадочного материала, неоднозначности физических свойств донных осадков в этих водоемах.

Скорость осадконакопления. Непостоянство положения уровня воды в Ангарских водохранилищах за период их эксплуатации способствует изменению питающих источников, объема и состава поставляемого ими материала, площадного распределения донных осадков и варьированию скоростей накопления осадков.

Во время трансгрессий в глубоководной части водохранилищ ежегодный прирост слоя осадков на порядок ниже темпов аккумуляции в их прибрежной зоне. Наиболее активно идет увеличение мощности песков, скорость накопления которых составляет 10 мм/год. Менее интенсивно осаждаются более дисперсные осадки. Так, для крупных алевритов и мелкоалевритовых илов скорость аккумуляции достигает 7 мм/год, алевритово-глинистых илов – 5 мм/год (табл. 1).

Наступление регрессии приводит к аккумуляции осадочного материала с иной скоростью. Песчаные фракции большей частью остаются в прибрежной части, за пределами отмелей скорость накопления песка составляет не более 2 мм/год. Темп накопления крупных алевритов достигает 9 мм/год, мелкоалевритовых илов – 7, алевритово-глинистых илов – 9 мм/год.

Следовательно, во время трансгрессий в водохранилищах наиболее интенсивно накапливаются пески и мелкоалевритовые илы. При стоянии низких уровней (регрессия) выше темп аккумуляции имеют крупные алевриты и алевритово-глинистые илы.

Гранулометрический состав и сортированность. Интенсивная переработка грубозернистого материала, поступающего в результате абразии пород береговой зоны в периоды трансгрессий, способствует формированию полей донных отложений, сложенных хорошо сортированным песчаным материалом, в котором среднее содержание песчаной фракции составляет более 80% (табл. 2). По содержанию песчаных частиц и медианному диаметру пески относятся к крупно- и среднезернистым разностям. Крупные алевриты имеют медианный диаметр от 0.052 мм и содержат значительное количество тонкопесчаных частиц (более 45%). В мелкоалевритовых илах содержание частиц менее 0.01 мм составляет около 30%, в алевритово-глинистых илах – более 50%.

При регрессии отсутствие поступления материала от размыва берегов благоприятствует активной переработке осадков, слагающих прибрежные отмели и попавших в зону волнового воздействия, т.е. уже прошедших определенную дифференциацию. В результате в осадочном комплексе начинают преобладать отмытые неплохо сортированные более тонкозернистые пески с $Md = 0.128$, в которых возрастает доля частиц диаметром менее 0.05 мм, при этом сортированность песков ухудшается. Снижается и медианный диаметр крупных алевритов до 0.047 мм, в которых происходит прирост количества частиц мельче 0.01 мм до 17.3%. И чем длительнее период стояния низких уровней, тем больше в осадках накапливается частиц менее 0.05 мм. Ведущей фракцией в мелкоалевритовых илах является 0.05–0.01 мм (более 40%), количество частиц мельче 0.01 мм – около 30%. Ме-

Таблица 1. Скорость осадконакопления и физические свойства донных отложений в Ангарских водохранилищах при трансгрессиях и регрессиях**Table 1.** The rate of sedimentation and physical properties of bottom deposits in the Angara reservoirs in the transgressions and regressions

Показатели	Типы осадка							
	Пески		Крупные алевриты		Мелкоалевритовые илы		Алевритово-глинистые илы	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Скорость осадконакопления, мм/год	10	2	7	9	7	7	5	9
Md, мм	0.200	0.128	0.052	0.047	0.031	0.035	0.006	0.009
S _o	1.57	1.90	2.40	1.97	3.01	2.23	3.61	2.68
Природная влажность, %	26.36	53.54	60.12	59.74	117.13	85.98	115.29	156.50
Плотность осадка, г/см ³	2.09	1.70	1.55	1.40	1.85	1.46	1.17	1.05
Плотность скелета, г/см ³	1.67	1.12	1.08	1.03	1.27	0.82	0.64	0.52
Пористость, %	21.15	34.45	32.06	27.26	32.26	55.84	36.21	46.93
Коэффициент пористости	0.27	0.57	0.50	0.39	0.59	1.32	0.81	1.12
Содержание органического вещества, %	4.39	4.81	8.40	11.05	12.05	11.81	17.03	10.61
Содержание карбонатов, %	9.12	22.66	15.92	20.52	20.57	23.09	20.99	25.08
Емкость поглощения, мг-экв/100 г	10.88	7.26	13.49	10.50	20.47	19.56	24.20	21.49

Примечание. 1 – трансгрессия, 2 – регрессия, Md – медианный диаметр осадка, S_o – коэффициент сортированности осадка.

Note. 1 – transgression, 2 – regression, Md – median sediment diameter, S_o – sediment sorting coefficient.

Таблица 2. Гранулометрический состав донных отложений Ангарских водохранилищ**Table 2.** Granulometric composition of bottom sediments of Angara reservoirs

Типы осадка		Медианный диаметр частиц, мм					
		>0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.002	0.002–0.001	<0.001
Содержание во фракции, %							
Пески	1	31.5	53.3	11.5	1.9	0.6	1.2
	2	21.2	51.2	21.1	4.2	1.4	0.9
Крупные алевриты	1	7.0	45.8	32.3	9.1	2.9	2.9
	2	4.6	44.0	34.1	11.4	2.5	3.4
Мелкоалевритовые илы	1	1.4	28.4	40.6	20.2	6.1	3.3
	2	2.3	28.2	44.5	15.9	4.2	4.9
Алевритово-глинистые илы	1	0.7	11.3	33.7	37.9	9.0	7.4
	2	0.9	10.7	37.7	34.9	7.6	8.2

Примечание. 1, 2 – см. табл. 1.

Note. 1, 2 – see Table 1.

дианный диаметр возрастает у мелкоалевритовых илов до 0.035 мм, у алевритово-глинистых илов – до 0.006 мм за счет увеличения внедрения в них частиц фракции 0.05–0.01 мм. И чем длительнее был период стояния низких уровней, тем больше в алевритово-глинистых илах накапливалось частиц менее 0.001 мм (см. табл. 2).

Природная влажность донных осадков водохранилищ в их естественном залегании изменяется в широких пределах, а именно от 5.2 до 403.75%. При трансгрессии менее увлажнены пески (26.36%) и крупные алевриты (60.12%). С увеличением дис-

персности осадков влажность их возрастает. Широкий разброс значений влажности был у мелкоалевритовых (от 36.0 до 232.4%) и алевритово-глинистых (от 84.9 до 226.2%) илов, что указывает на активное поглощение воды, разжижение и на их исходное текучее или скрыто текучее состояние. Средняя же величина влажности составляет у мелкоалевритовых – 117.15% – и алевритово-глинистых илов – 115.29%.

На период регрессий донные осадки реагируют по-разному: незначительным снижением природной влажности у крупных алевритов (на 0.38%),

высоким падением – у мелкоалевритовых илов (на 31.15%) и ростом – у песков (на 27.18%) и алевритово-глинистых илов (на 41.21%). Снижение влажности мелкоалевритовых илов вызвано наличием их способности к просадочности, когда при “отжати” влаги происходит выпадение труднорастворимых солей из поровых растворов. Увеличение влажности песков обусловлено ростом их пористости при снижении плотности осадка и его скелета и, возможно, ростом в них содержания органического вещества и карбонатов. При заполнении водой пор в алевритово-глинистых илах происходит их набухание и увеличение влажности.

Плотность осадка. Все типы донных отложений исследуемых водохранилищ имеют наибольшую плотность осадка во время трансгрессий. Среди них наибольшей плотностью обладают пески (2.09 г/см^3), их плотность зависит в определенной степени от прочности зерен кварца. Наименьшей плотностью осадка обладают алевритово-глинистые илы (1.17 г/см^3), т.е. донные отложения с высоким содержанием тонкодисперсных частиц. Кроме того осадки, находясь в воде, уплотняются также под действием своей массы.

Во время регрессий плотность осадков уменьшается. Наибольшее снижение приходится на пески и мелкоалевритовые илы, составляя 0.39 г/см^3 , возможно, из-за роста их карбонатности. На меньшую величину падение плотности происходит у крупных алевритов – на 0.15 г/см^3 – и алевритово-глинистых илов – на 0.12 г/см^3 .

Плотность скелета. Она у всех типов донных осадков выше во время трансгрессий. Величина плотности минеральной части донных осадков является наибольшей в песках, что, возможно, связано с их обогащением минералами с высокой плотностью. По мере увеличения дисперсности осадка и с ростом его пористости происходит снижение плотности скелета. Наибольшая плотность осадка и его скелета приходится на пески и мелкоалевритовые илы, т.е. на осадки с наиболее высокой скоростью накопления.

При стоянии низких уровней воды отмечается понижение плотности скелета донных осадков. В большей степени это происходит у песков (на 0.55 г/см^3) и мелкоалевритовых илов (на 0.45 г/см^3), которые при трансгрессии имеют наибольшую среди осадков плотность. Незначительно плотность скелета сокращается у крупных алевритов (на 0.05 г/см^3) и алевритово-глинистых илов (на 0.12 г/см^3).

Пористость осадка и коэффициент пористости. Периодическое поступление значительных объемов материала абразии берегов при стоянии высоких уровней способствует резкому снижению пористости почти всех осадков, связанному с их уплотнением при осаднении новых порций минеральных частиц. Пористость сложения донных осадков водохранилищ тесно связана со сте-

пенью их дисперсности. Все типы донных осадков низкопористы: пористость у песков – 21.15, у крупных алевритов – 32.06, у мелкоалевритовых илов – 32.26 и у алевритово-глинистых илов – 36.21%. Поры их заполнены мелкими частицами, что способствует плотной упаковке как осадка в целом, так и его скелета.

Периоды регрессий сопровождаются ростом пористости у песков примерно на 13.3, у мелкоалевритовых илов – на 23.58, у алевритово-глинистых илов – на 10.72% в результате снижения плотности осадков и увеличения их влажности. Увеличение пористости обусловлено растворением первичного карбонатного цемента, который становится неустойчивым в условиях постоянного воздействия гидродинамического фактора, способствующего переходу осадочного материала из одной среды (литосферы) в другую (гидросферу), из одного состояния (твердого) в другое (полужидкое). И только у крупных алевритов пористость снижается примерно на 4.80% за счет заполнения пор органическим веществом.

Органическое вещество. По его содержанию донные осадки Ангарских водохранилищ превосходят осадки оз. Байкал. Основное количество органики в донных отложениях водохранилищ, в отличие от озерных отложений, имеет терригенное происхождение, ведущими источниками которого служат абразия береговой части водоема и речной сток. Сингенетическое органическое вещество (фито-, зоопланктон, зообентос) имеет подчиненное значение. При трансгрессии содержание органического вещества в песках (4.39) и крупных алевритах (8.40%) является наименьшим среди других типов осадков. Самые влажные мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы содержат наибольшее количество органического вещества, составляющее 12.05 и 17.03% соответственно. Существует прямая связь содержания органического вещества во всех типах отложений с их емкостью поглощения, коэффициентом пористости и влажностью.

Во время регрессии отмечается рост содержания органического вещества в песках и крупных алевритах относительно его количества во время трансгрессии. В крупных алевритах рост количества органического вещества в осадке примерно на 3.5% происходит при увеличении темпа накопления крупных алевритов всего на 1 мм/год, что приводит к снижению их пористости на 18%, уплотнению скелета примерно на 0.5% (Karnaukhova, 2016). В мелкоалевритовых и алевритово-глинистых илах содержание органического вещества уменьшается в результате заполнения пор водой либо ее выдавливания и замещения дисперсными минеральными и карбонатными соединениями.

Карбонаты. При трансгрессиях карбонатность донных осадков Ангарских водохранилищ в большей мере связана с составом исходного материала.

ла. Особенно значительно присутствие карбонатов в осадках на участках абразии берегов, сложенных известковистыми песчаниками, суглинками и аргиллитами, в составе которых карбонатный материал присутствует в количестве 24.0, 22.13 и 21.20% соответственно. По химическому составу карбонаты в донных осадках представлены CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 при доминировании CaCO_3 . Наибольшее количество карбонатов аккумулируется в более влажных мелкоалевритовых (20.57) и алевритово-глинистых (20.99%) илах. Меньше всего карбонатного материала остается в песках (9.12%).

При регрессиях количество карбонатного материала возрастает во всех типах донных осадков по сравнению с периодами трансгрессий. Особенно значимый рост отмечается в песках (до 22.66%) за счет возникновения благоприятных условий для садки CaCO_3 , в частности, более теплой и перенасыщенной карбонатами воды. В то же время размыв отмелей и разрушение обломков карбонатного состава приводят к их частичному выносу в наиболее глубоководные части водохранилища, где содержание карбонатов в воде снижается и происходит их накопление в виде цемента в алевритово-глинистых илах (25.08%).

Емкость поглощения. Обменный комплекс донных отложений водохранилищ представлен рядом $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$. Основу поглощающего комплекса составляют Ca^{2+} и Mg^{2+} .

При трансгрессиях донные осадки обладают низкой и средней поглотительной способностью. Наблюдается рост емкости поглощения с увеличением количества тонкодисперсных фракций в осадках. Наименьшей поглотительной способностью обладают пески (10.88 мг-экв/100 г), наибольшей – алевритово-глинистые илы (24.20 мг-экв/100 г). Существует прямая связь емкости поглощения с содержанием органического вещества в донных осадках и их влажностью и пористостью.

Периоды регрессий характеризуются снижением поглотительной способности донных осадков. Причем особенно резкое снижение характерно для песков (на 33.3%), крупных алевритов (на 22.2%), меньшее – у мелкоалевритовых (на 4.4%) и алевритово-глинистых (на 11.2%) илов. Одной из возможных причин снижения емкости поглощения может быть уменьшение глубин (высотного положения уровня) и попадание донных осадков в зону активного волнового воздействия с их размывом, взмучиванием и переходом частиц во взвешенное состояние.

Выполненные нами исследования и полученные результаты свидетельствуют о неоднозначности реакции физических свойств различных типов донных осадков на колебания уровней воды в водохранилищах. Так, во время трансгрессий в водохранилищах наиболее интенсивно накапливаются пески, крупные алевриты и мелкоалевритовые илы.

При регрессиях более высокий темп аккумуляции имеют крупные алевриты и алевритово-глинистые илы. Среди осадков пески имеют лучшую сортированность во время трансгрессий. При любом положении уровня воды в водохранилищах у песков высокая влажность. Во время трансгрессии они имеют почти одинаковые значения показателей влажности и пористости, что свидетельствует о насыщении водой и их двухфазности. При регрессии, когда скорость накопления песков сильно снижается, происходит увеличение их влажности и пористости. Пески становятся переувлажненными, что приводит к снижению плотности упаковки и проявлению их текучести, при этом происходит обогащение песчаных отложений карбонатным и органическим материалом.

Для крупных алевритов во время трансгрессий характерна более низкая скорость накопления, чем при регрессиях. При регрессии под действием увеличения слоя у крупных алевритов происходит снижение влажности, пористости, что указывает на уплотнение этого типа осадка. Кроме того, увеличение карбонатности крупных алевритов при регрессии может также способствовать снижению их пористости и сохранению крупности зерен.

Мелкоалевритовые илы накапливаются с одинаковой скоростью вне зависимости от положения уровня воды в водохранилищах. Во время трансгрессий осадки имеют наиболее высокие показатели влажности, плотности осадка и его скелета, а также содержания органического вещества и емкости поглощения. При стоянии низких уровней и снижении влажности в результате отжатия воды с вытеснением ее из порового пространства происходит рост пористости мелкоалевритовых илов и заполнение пор карбонатным материалом. В это же время сокращение количества органического вещества в мелкоалевритовых илах способствует уменьшению их емкости поглощения.

Наибольшая скорость накопления алевритово-глинистых илов приходится на периоды регрессий. Несмотря на увеличение давления, обусловленного повышением скорости аккумуляции частиц при регрессиях, в осадках возрастает пористость и влажность, что характерно для молодых илов этого типа. Пористость увеличивается в результате разбухания алевритово-глинистого ила и перехода в текучее состояние при высокой его влажности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Байков А.А., Седлецкий В.И. (2005) Количественные методы в геологии. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 272 с.
Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Иркутской области в 2016 году. (2017) Иркутск: Мегалит, 274 с.
Гроссгейм В.А., Бескровная О.В., Геращенко И.Л.,

- Окнова Н.С., Рожков Г.Ф. (1984) Методы палеогеографических реконструкций (при поисках залежей нефти и газа). Л.: Недра, 271 с.
- Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (1980–1986 гг.). Т. 1. РСФСР. Вып. 1. Бассейн реки Ангары, озера Байкал и реки Лены. Ч. 2. Озера и водохранилища. Обнинск: Изд-во ВНИИГМИ-МИД, 192 с.
- Карнаухова Г.А. (1998) Миграция осадочного материала в Братском водохранилище. *Метеорология и гидрология*, (7), 98–104.
- Карнаухова Г.А. (2014) Прибрежная зона осадконакопления в Ангарских водохранилищах. *Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле*, (10), 67–77.
- Карнаухова Г.А., Сквитина Т.М. (2013) Формирование донных отложений в прибрежной зоне Ангарских водохранилищ. *Геоморфология*, (3), 71–78.
- Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. (1986) Методы определения осадочных пород. Л.: Недра, 240 с.
- Ломтадзе В.Д. (1972) Методы лабораторных исследований физико-химических свойств горных пород. Л.: Недра, 372 с.
- Ломтадзе В.Д. (1990) Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 328 с.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. (1987) Т. 1. РСФСР. Вып. 13, 14. Бассейн реки Ангары и озера Байкал. Ч. 2. Озера и водохранилища. Ленинград: Гидрометеиздат, 174 с.
- Овчинников Г.И., Карнаухова Г.А. (1985) Прибрежные наносы и донные отложения Братского водохранилища. Новосибирск: Наука, 68 с.
- Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (РВ-269-87). (1988) М.: Изд-во Мин-ва мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 65 с.
- Технический проект. (1951) Т. 1. Ч. 2. М.: Гидроэнергопроект, 220 с.
- Холодов В.Н. (1997) Скорости осадконакопления в настоящем и прошлом. *Отеч. геология*, (3), 22–31.
- Karnaukhova G.A. (2016) Cyclicity of Sedimentation and Physical Properties of the Bottom Sediments in Artificial Reservoirs. *Dokl. Earth Sci.*, **471**(2), 1230–1233.
- ushchei sredy Irkutskoi oblasti v 2016 godu [State report on the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2016]. (2017) Irkutsk, Megaprint Publ., 274 p. (In Russian)
- Grossgeim V.A., Beskrovnaya O.V., Geraschenko I.L., Oknova N.S., Rozhkov G.F. (1984) *Metody paleogeograficheskikh rekonstruktsii (pri poiskakh zalezhei nefti i gaza)* [Methods of paleogeographic reconstructions (when searching for deposits of oil and gas)]. Leningrad, Nedra Publ., 271 p. (In Russian)
- Holodov V.N. The sedimentation rate in the present and past. *Otech. Geol.*, (3), 22–31. (In Russian)
- Karnaukhova G.A. (1998) Migration of sedimentary material in the Bratsk reservoir. *Meteorol. Gidrol.*, (7), 98–104. (In Russian)
- Karnaukhova G.A. (2014) Coastal sedimentation zone in Angarsk reservoirs. *Izv. IGU. Ser. Nauki o Zemle*, (10), 67–77. (In Russian)
- Karnaukhova G.A. (2016) Cyclicity of Sedimentation and Physical Properties of the Bottom Sediments in Artificial Reservoirs. *Dokl. Earth Sci.*, **471**(2), 1230–1233. (In Russian)
- Karnaukhova G.A., Skovitina T.M. (2013) Formation of sediments in the coastal Angarsk reservoirs. *Geomorfologiya*, (3), 71–78. (In Russian)
- Logvinenko N.V., Sergeeva E.I. (1986) *Metody opredeleniya osadochnykh porod* [Methods for determining sedimentary rock]. Leningrad, Nedra Publ., 240 p. (In Russian)
- Lomtadze V.D. (1972) *Metody laboratornykh issledovaniy fiziko-khimicheskikh svoystv gornykh porod* [Laboratory methods for physicochemical properties of rocks]. Leningrad, Nedra Publ., 372 p. (In Russian)
- Lomtadze V.D. (1990) *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornykh porod. Metody laboratornykh issledovaniy* [Physical and mechanical properties of rocks. Laboratory methods]. Leningrad, Nedra Publ., 328 p. (In Russian)
- Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. V. 1. RSFSR. Vyp. 13, 14. Bassein reki Angary i ozero Baikal. Ch. 2. Ozero i vodokhranilishcha [Long-term data on the regime and resources of surface land waters. T. 1. RSFSR. Issue 13, 14. The basin of the Angara River and Lake Baikal. Part 2 Lakes and reservoirs]. (1987) Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 174 p. (In Russian)
- Osnovnye pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov vodokhranilishch Angarskogo kaskada GES (RB-269-87) [Basic rules for the use of water resources of the Angara cascade reservoirs HPP (RV-269-87)]. (1988) Moscow, Ministerstvo melioratsii i vodnogo khozyaistva RSFSR Publ., 65 p. (In Russian)
- Ovchinnikov G.I., Karnaukhova G.A. (1985) *Pribezhnnye nanosy i donnye otlozheniya Bratskogo vodokhranilishcha* [Coastal sediments and bottom sediments of the Bratsk reservoir]. Novosibirsk, Nauka SO RAN, 68 p. (In Russian)
- Tekhnicheskii projekt. T. 1. Ch. 2 [Technical project. T. 1. Pt 2]. (1951) Moscow, Gidroenergoproekt Publ., 220 p. (In Russian)

REFERENCES

- Baikov A.A., Sedletskii V.I. (2005) *Kolichestvennye metody v geologii* [Quantitative Methods in Geology]. Rostov n/D., SKNTs VSh Publ., 272 p. (In Russian)
- Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi (1980–1986 gg.). T. 1. RSFSR. Vyp. 1. Bassein reki Angary, ozero Baikal i reki Leny. Ch. 2. Ozero i vodokhranilishcha [Annual data on the regime and resources of surface land waters. T. 1. RSFSR. Issue 1. The basin of the Angara River, Lake Baikal and the Lena River. Pt 2 Lakes and reservoirs]. Obninsk, VNIIGMI-MID Publ., 192 p. (In Russian)
- Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i okhrane okruzh-