



УДК 552.142/143

## **Литологический состав донных осадков в барьерной зоне «река – водохранилище» (на примере Братского водохранилища)**

Г. А. Карнаухова ([karnauh@crust.irk.ru](mailto:karnauh@crust.irk.ru))

**Аннотация.** Рассмотрен литологический состав донных осадков в специфической барьерной зоне «река – водохранилище», сформировавшейся в условиях прерванной каскадности ангарских водохранилищ. Проанализированы источники поступления осадкообразующего материала в барьерную зону и ее гидрологический режим. Выделены основные типы донных отложений, приведены данные по их гранулометрическому и минеральному составам.

**Ключевые слова:** водохранилища, барьерная зона, донные осадки, литологический состав.

### **Постановка проблемы**

В пределах природных водоемов есть специфические зоны, где идут основные процессы переформирования состава воды, взвесей и донных отложений. Эти зоны являются областями с наиболее высокой концентрацией осадочного материала и называются глобальными уровнями седиментации, маргинальными фильтрами [11; 12] или барьерными зонами [3; 4]. Такие зоны становятся ловушками осадочного материала, наблюдается сверхбыстрый вертикальный поток этого материала и его усиленная аккумуляция. В то же время существует особый, еще слабо исследованный, тип барьерных зон, возникновение которых связано с регулированием естественного стока рек и созданием водохранилищ. В результате происходит изменение природных закономерностей – гидрологического режима и русловых процессов реки, условий седиментации наносов.

Искусственные водоемы, созданные на р. Ангаре между Иркутским и Братским водохранилищами, имеют прерванную каскадность, т. е. от плотины Иркутской ГЭС р. Ангара протяженностью 98 км является незарегулированным участком. И только ниже река попадает в зону регулирования Братского водохранилища. Верхняя часть зоны регулирования водохранилища включает область переменного подпора и область постоянного подпора, где и формируется барьерная зона «река – водохранилище» (рис. 1). Протяженность данной зоны более 90 км, площадь – 135 км<sup>2</sup> [7; 8]. Эта барьерная зона является областью, переходной от реки к водохранилищу, в которой гидрологический режим сохраняет черты, присущие реке, и в то же



Для изучения особенностей становления литологического состава нами были поставлены следующие задачи: определить источники питания барьерной зоны осадочным материалом, проанализировать обстановки накопления осадочного материала в барьерной зоне; установить количественные показатели гранулометрического и минералогического состава донных отложений.

### **Методы и объект исследования**

Исследование литологического состава донных отложений проводилось на основе материалов, полученных автором при многолетних экспедиционных и лабораторно-аналитических работах. В пределах барьерной зоны «река – водохранилище» экспедиционные работы включали профильный отбор образцов пород, слагающих береговые уступы, отбор образцов донных отложений с борта научно-исследовательского судна грунтоотборной трубкой ПИ-27-II по профилям через 50, реже 100 м. Профильный отбор образцов донных отложений дополнялся отбором проб воды батометром Молчанова и измерением скоростей течения вертушкой ВММ. С использованием оборудования Аналитического центра Института земной коры СО РАН и Байкальского аналитического центра коллективного пользования СО РАН в лабораторных условиях выполнялось определение гранулометрического состава донных осадков ситовым, Сабанина, пипеточным и комбинированным методами. Определение минералогического состава образцов состояло в просмотре под микроскопом частиц алевритовой размерности осадков после их отмучивания и обработки иммерсионными препаратами с последующим делением на фракции. Для достоверности в каждом образце исследовались более 300 зерен. При расчетах распределения минералов в тяжелой и легкой фракциях их содержание для каждой фракции принималось за 100 %. Определение глинистых минералов в образцах донных отложений выполнено количественным рентгенофазовым анализом на дифрактометре ДРОН-3.0, излучение –  $\text{Cu K}\alpha$ ,  $\text{Ni}$  – фильтр. Напряжение – 25 кВ, ток на трубке – 20 мА. При изучении химического состава донных отложений использовались как химические, так и инструментальные методы (рентгенофлуоресцентный, эмиссионный спектральный, атомно-абсорбционный). Определялись основной химический состав, главные ионы, биогенные элементы, суммарное органическое вещество и органический углерод, микроэлементы. Поступление материала в составе твердого речного стока определено нами отдельно для взвешенных и влекомых наносов. Для взвешенных наносов были использованы данные выполненных нами измерений их расходов. Сток влекомых наносов определялся с помощью расчетных зависимостей, предложенных Г. И. Шамовым [17], которые дают хорошую сходимость с натурными материалами.

## Результаты исследования

*Источники поступления осадкообразующего материала.* Осадконакопление в барьерной зоне происходит за счет материала, приносимого Ангарой и ее притоками – реками Иркутом, Китоем и Белой. Верхние части бассейнов Иркуты, Китоя, Белой, берущих начало в горах Восточного Саяна, сложены породами архея. Архейские породы, надвинутые на юру, слагают и исток р. Ангары. Породы архея представлены метаморфическим комплексом, в котором наиболее распространены гнейсы, кристаллические сланцы, кварциты, амфиболиты, мигматиты, мраморы. Породы палеозоя в бассейне рек Иркуты, Китоя и Белой представлены интрузивными образованиями, включая гранитоиды и сиениты [2; 14–16; 18]. Основная же часть водосборного бассейна рек находится в пределах южной части Сибирской платформы, чехол которой здесь составляют породы кембрийской, юрской и кайнозойской систем. Кембрийские отложения представлены в основном пестроцветными толщами песчаников, аргиллитов и известняков, крайне нестойких к процессам физического выветривания. Значительная часть кембрийских отложений представлена аргиллитами. Основной фон разреза отложений кембрия составляют слабо доломитизированные известняки, которые, в отличие от аргиллитов, значительно менее карбонатны, но в известняках выше содержание слюд. В состав цементирующей массы известняков, как и аргиллитов, входит гидроокись железа. Мезозойские отложения выполнены юрскими сероцветными песчаниками, составляющими 55–75 % всего разреза юрских отложений [1; 13]. Рыхлый покров кайнозоя состоит из четвертичных аллювиальных и делювиальных отложений, из которых наиболее представительны имеющие прерывистый характер распространения аллювиальные отложения. Преобладают пески, супеси и суглинки русел, пойм, островов и террасовых комплексов [8].

Среднегодовая величина поступления осадкообразующего материала в барьерную зону Ангары составляет более 1,8 млн т, из которых около 77 % приносится во взвешенном состоянии и 23 % – волочением. Основной вклад (72 %) в питание барьерной зоны осадочным материалом вносит р. Ангара, притоки же ежегодно поставляют около 0,5 млн т [9]. Характерным для Ангары является дефицит руслообразующих (влекомых) наносов, обусловленный питанием реки из оз. Байкал и наличием устойчивого к размыву галечного дна. Однако наличие гидроэнергетических объектов, сооружение карьеров в русле реки с перекрытием пойменных проток и разработка островов при добыче нерудных строительных материалов приводят к русловым деформациям Ангары, что способствует формированию потока влекомого песчано-галечного материала, который частично поступает в верхнюю часть барьерной зоны, и потока взвешенных частиц [10].

Наибольший вынос взвешенных наносов реками наблюдается с июня по август, составляя от 81,5 до 91,1 % их годового поступления, зимний сток незначителен. В связи с зарегулированностью водного стока р. Ангары вышерасположенным Иркутским водохранилищем сток взвешенных наносов реки более равномерен, чем на других рассматриваемых реках. И все же в

теплое время года сток наносов р. Ангары составляет более половины (54,9–64,2 %) годового. Самый высокий среднемесячный расход взвешенных наносов бывает в июле и составляет в среднем 25 % годового [10].

*Гидрологические условия и седиментация.* В барьерной зоне терригенный материал попадает в условия пониженных скоростей потока, в которых способность потока его транспортировать резко сокращается. В соответствии с изменением скоростей движения потока происходит осаждение поступившего материала и формирование различных литологических типов донных отложений. Каждый тип осадка занимает определенный участок на дне с наиболее благоприятными для его осаждения гидродинамическими условиями. Гидродинамический режим лимитирует критическую скорость, необходимую для срыва частиц различного гранулометрического состава. По мере убывания скоростей течения вниз по области переменного подпора происходит накопление на дне терригенного материала с уменьшением его крупности, т. е. происходит сортировка по размеру частиц.

Скорость водного потока в русле р. Ангары перед барьерной зоной изменяется от 2,5 до 1,4 м/с. В верхней части барьерной зоны, от г. Усолья-Сибирского до с. Кулаково, скорость течения снижается с 0,9 до 0,6 м/с. Такие скорости течения приводят к остановке потока влекомых частиц и их аккумуляции в виде гряд, состоящих из мелкой гальки, гравия, крупнозернистого песка. Гряды расположены группами, имеют небольшую протяженность и почти симметричный продольный профиль. Продолжительность существования гряд зависит от величины сработки водохранилища. Размеры гряд гораздо меньше речных, что объясняется кратковременностью их формирования.

Устойчивая седиментация уже более тонкозернистого материала происходит при скорости водного потока менее 0,52 м/с. Так, между участками Кулаково и Буреть фиксируется аккумуляция мелкозернистого песчаного материала, переносимого как в составе влекомых, так и взвешенных наносов. Ориентировочно скорость накопления песка составляет 1,86 см/год [6]. Пески осаждаются сплошным покровом, в котором присутствуют пятна и линзы крупных алевритов и мелкоалевритовых илов мощностью от 1–2 мм.

Ниже участка Буреть находится самый протяженный отрезок барьерной зоны, где основной формой перемещения осадочного материала становится взвесь. И при скорости течения меньше 0,29 м/с происходит устойчивая седиментация частиц крупностью 0,05–0,01 мм. Дальнейшее снижение скорости водного потока до 0,22–0,27 м/с приводит к перемещению в придонном горизонте воды тонкозернистого материала и его активной седиментации. Большая часть материала, поступающего в барьерную зону, осаждается между участками Свирск и Каменка, где поток осадочного материала на дно достигает  $93 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}/\text{сутки}^{-1}$ , мощность донных отложений составляет 50 см и более. В нижней части барьерной зоны происходит снижение величины потока до  $11 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}/\text{сутки}^{-1}$  и, соответственно, мощности донных отложений уменьшаются до 4–20 см на участке Казачье и до 3–18 см на участке Середкино [7].

*Состав донных отложений.* Основными структурными типами донных отложений в барьерной зоне являются галька, песок, крупные алевриты, мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы.

Как было сказано выше, в верхней части барьерной зоны до участка Кулаково дно сложено мелкой галькой, гравием, крупнозернистым песком. Исходя из гидравлических параметров руслообразующих наносов р. Ангары, из которых и формируются потоки волочения, средний размер галек может быть 10–15 мм, а максимальный – не более 50 мм.

Ниже Кулаково на речном аллювии гравийно-галечного состава слоем в 6–7 см залегают темно-серые тонкозернистые пески (рис. 2). В песках фракция крупнее 0,25 мм составляет 2,7–9,0 % при вкладе алевритово-пелитовых частиц от 26,1 до 31,9 %. Максимальное осаждение самых крупных зерен песка фиксируется в осевой и прибрежной частях на участке Буреть, где содержание тонкодисперсных частиц не превышает 19,0 %. Песчаный материал неплохо сортирован, коэффициент сортированности равен 1,41. Хорошая сортированность отложений связана с длительным их нахождением в турбулентном режиме водного потока. Содержание минералов в легкой фракции доходит до 97,2 %. Основным минералом является кварц, в почти одинаковых количествах присутствуют полевой шпат и слюды [10]. Между Буретью и 130-м километром осадки песчаного состава отсутствуют. При резком изгибе потока и смене его направления с западного на северное на участке 130-й километр происходит массовый переход в осадки осевой части барьерной зоны фракций 0,25–0,05 мм и < 0,05–0,01 мм, перемещающихся до этого в придонном горизонте.

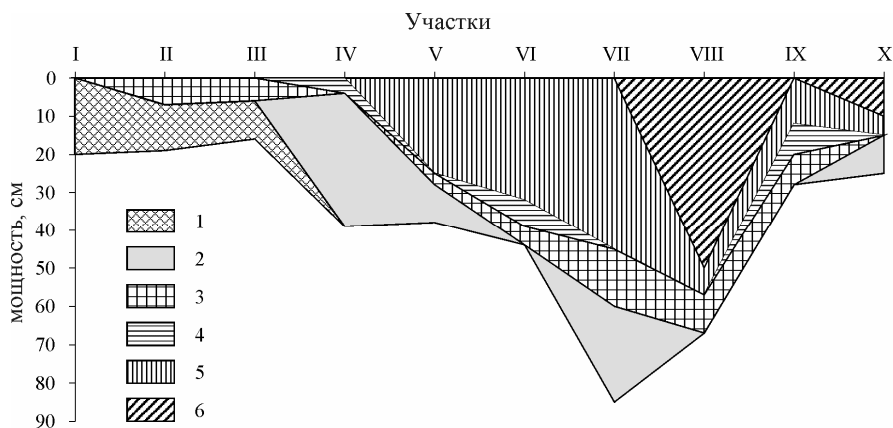


Рис. 2. Продольный разрез донных отложений по судовому ходу барьерной зоны «река – водохранилище»

*Условные обозначения:* 1 – речной аллювий (песок с гравием, галькой); 2 – заболоченная почва; 3 – песок; 4 – крупный алеврит; 5 – мелкоалевритовый ил; 6 – алевритово-глинистый ил.

*Участки наблюдений:* I – 110-й километр; II – Кулаково; III – Буреть; IV – 125-й километр; V – 130-й километр; VI – 135-й километр; VII – Свирск; VIII – Каменка; IX – Казачье; X – Середкино (отсчет километров начинается от плотины Иркутской ГЭС)

Крупные алевриты создают значительный покров между участками Буреть и 125-й километр, тяготея в большей степени к левобережью. В нижней части барьерной зоны этот тип осадков перекрыт, как правило, мелкоалевритовыми илами. И только по-прежнему по левобережью на участке Свирск на пойменной иловой фации отложился 15-сантиметровый слой крупного алеврита. В крупных алевритах присутствует значительное количество (46,8–52,1 %) частиц размером 0,25–0,05 мм. Содержание частиц фракции < 0,05–0,01 мм может колебаться в пределах 35,3–40,8 % (табл.).

Таблица

Участки	Содержание фракций, %					
	> 0,25 мм	0,25–0,05 мм	< 0,05–0,01 мм	< 0,01–0,002 мм	< 0,002–0,001 мм	< 0,001 мм
<b>Пески</b>						
Кулаково	9,0	59,1	25,0	4,5	2,2	0,2
Буреть	43,9	37,2	17,1	1,2	0,3	0,3
130-й км	2,7	71,2	19,8	4,9	0,1	1,3
135-й км	3,3	64,9	25,2	5,0	0,8	0,8
<b>Крупные алевриты</b>						
Буреть	1,3	52,1	35,3	7,6	2,5	1,2
125-й км	2,7	46,8	40,8	8,0	1,4	0,3
135-й км	0,7	27,0	63,4	6,6	1,8	0,5
Свирск	0,8	47,7	43,4	3,1	3,0	1,4
Каменка	6,4	50,5	35,7	5,7	0,4	1,3
Казачье	2,4	40,8	38,1	13,3	2,9	2,5
<b>Мелкоалевритовые илы</b>						
125-й км	0,7	35,8	39,5	12,2	11,0	0,8
130-й км	0,9	15,9	66,7	6,5	8,4	1,6
135-й км	0,4	13,3	63,5	18,8	3,9	0,1
Свирск	0,7	22,6	53,0	14,6	1,7	7,4
Каменка	0,1	6,6	59,4	24,8	5,1	4,0
Казачье	0,5	8,1	61,2	24,3	4,0	1,9
Середкино	0,6	25,2	56,8	14,0	1,7	1,7
<b>Алевритово-глинистые илы</b>						
Каменка	0,0	8,0	41,1	41,1	4,2	5,6
Середкино	1,5	12,7	32,9	39,7	6,9	6,3

Скорость накопления крупных алевритов составляет от 2 до 5 мм/год. В их минеральном составе характерным является значительное содержание слюды и агрегатов глинистых минералов. В тяжелой фракции основными минералами служат рудные и гранаты. Возрастает доля пироксенов и минералов группы метаморфических пород. Отличительная черта – наименьшее для осадков барьерной зоны содержание роговой обманки.

Мелкоалевритовые темно-серые пластично-полужидкие илы в виде отдельных линз, отложившихся на тонкозернистом песке, появляются по правобережью уже на участке 125-й километр. Ниже по течению площадь их распространения увеличивается. В целом по барьерной зоне в мелкоалеври-

товых илах частицы размером  $< 0,05-0,01$  мм составляют от 39,5 до 66,7 %, количество пелитовых частиц может доходить до 30,0 %. Сортированность осадков снижается за счет уменьшения скоростей течения и массовой аккумуляции терригенного материала малой размерности. В минеральном составе илов, по сравнению с крупными алевритами, резко возрастает содержание слюд и агрегатов глинистых минералов при снижении количества кварца и полевых шпатов. Среди минералов тяжелой фракции основными являются роговая обманка и эпидот. Наибольшая толщина слоя мелкоалевритовых илов, залегающих на тонкозернистом ранее отложившемся песке, приходится на участок Свирск, составляя 45 см. Массовое осаждение терригенного материала со скоростью 2,2–5,0 мм/год происходит между участками Свирск и Каменка.

Алевритово-глинистые илы имеют в барьерной зоне ограниченное по площади распространение. Они, мощностью до 50 см, фиксируются в левобережной части на участке Каменка и мощностью до 5 см – в затопленном русле Ангары на участке Середкино. Алевритово-глинистые илы имеют темно-серый цвет и плохую сортированность ( $S_o = 2,41$ ). Частицы мельче 0,01 мм составляют более 50,0 %. Осадки этого типа имеют аномально низкое содержание минералов тяжелой фракции, в которой доминируют роговая обманка и рудные минералы. На долю минералов легкой фракции приходится 99,9 %, из которых более 58,0 % находится в агрегатном состоянии, 27,0 % составляют слюды, в основном биотит.

### **Заключение**

В условиях прерванной каскадности ангарских водохранилищ в верхней части Братского водохранилища сформировалась барьерная зона «река – водохранилище», в которой под влиянием существующих особенностей обстановки осадконакопления происходит интенсивная дифференциация поступающего терригенного материала. Основным питающим источником барьерной зоны служит сток р. Ангары и ее верхних притоков. Занимая всего около 2 % площади ангарских водохранилищ, барьерная зона «река – водохранилище» перехватывает 64 % твердого речного стока.

Распределение донных осадков по длине барьерной зоны происходит в соответствии со скоростным режимом водного потока, формируются различные по литологическому составу типы донных отложений. Так, при скорости течения 0,9–0,5 м/с наблюдается аккумуляция гравийно-галечного материала и крупнозернистого песка, при скорости 0,52–0,29 м/с осаждаются тонкозернистые пески. Снижение скоростного поля до 0,29–0,27 м/с способствует накоплению крупноалевритового материала, а до 0,27–0,22 м/с – мелкоалевритовых илов. При перемещении воды со скоростью менее 0,22 м/с происходит седиментация тонкодисперсных частиц, формирующих алевритово-глинистые илы.

Основным минералом песков является кварц (более 50,0 %), в почти одинаковых количествах присутствуют полевой шпат и слюды. В тяжелой фракции крупных алевритов ведущими оказываются рудные минералы и



гранаты. Характерной чертой этого типа осадков служит значительное содержание слюд и агрегатов глинистых минералов и наименьшее для осадков барьерной зоны содержание роговой обманки. В то же время в мелкоалевритовых илах роговая обманка – основной минерал в тяжелой фракции. Алевритово-глинистые илы представлены аномально низким для барьерной зоны содержанием минералов тяжелой фракции (0,1 %). Лидирующая легкая фракция более чем на 58,5 % состоит из минералов, находящихся в агрегатном состоянии, значительна доля биотита (27 %).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00079\_а.*

#### Список литературы

1. Братское водохранилище. Инженерная геология / отв. ред. М. М. Одинцов. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 275 с.
2. Елизарьев Ю. З. К стратиграфии Шарыжалгайского комплекса юго-западного Прибайкалья // Тр. Вост.-Сиб. геол. ин-та. Сер. геол. – 1959. – Вып. 2. – С. 21–34.
3. Геохимия осадочного процесса в Балтийском море / Е. М. Емельянов [и др.] ; отв. ред. Е. М. Емельянов, В. Н. Лукашин. – М. : Наука, 1986. – 228 с.
4. Емельянов Е. М. Барьерные зоны в океане: Осадко- и рудообразование, геоэкология / Е. М. Емельянов. – Калининград : Янтар. сказ, 1998. – 416 с.
5. Карнаухова Г. А. Миграция осадочного материала в Братском водохранилище // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 1. – С. 98–104.
6. Карнаухова Г. А. Терригенная седиментация в областях переменного подпора Братского водохранилища // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 11. – С. 86–94.
7. Карнаухова Г. А. Седиментационная система реки Ангары после зарегулирования стока // Докл. РАН. – 2007. – Т. 413, № 4. – С. 507–509.
8. Карнаухова Г. А. Литолого-геохимическая барьерная зона реки Ангары // Докл. РАН. – 2007. – Т. 415, № 2. – С. 223–224.
9. Карнаухова Г. А. Роль барьерных зон в осадконакоплении Ангарских водохранилищ // Приоритетные и инновационные направления литологических исследований : материалы 9-го Урал. литол. совещания / отв. ред. А. В. Маслов. – Екатеринбург, 2012. – С. 51–53.
10. Карнаухова Г. А. Обстановки формирования минерального состава донных отложений в барьерной зоне реки Ангары / Г. А. Карнаухова, Т. М. Сквитина // Литология и полезные ископаемые. – 2014. – № 2. – С. 165–177.
11. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. – 1994. – Т. 34, № 5. – С. 735–743.
12. Лисицын А. П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45, № 1. – С. 15–48.
13. Надеждин Б. И. Лено-Ангарская лесостепь / Б. В. Надеждин. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 328 с.
14. Петрова З. И. Петрология и геохимия гранулитовых комплексов Прибайкалья / З. И. Петрова, В. И. Левицкий ; отв. ред. Ф. А. Летников. – Новосибирск : Наука, 1984. – 201 с.
15. Сизых А. И. Петрография магматических пород : учеб. пособие / А. И. Сизых, М. А. Юденко. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2007. – 123 с.

16. *Слюдянский* кристаллический комплекс / Е. П. Васильев, Л. З. Резницкий, В. Н. Вишняков, Е. А. Некрасова ; отв. ред. С. М. Замараев. – Новосибирск : Наука, 1984. – 197 с.

17. *Шамов Г. И.* Речные наносы / Г. И. Шамов. – М. : Гидрометеиздат, 1959. – 347 с.

18. *Эволюция* земной коры в докембрии и палеозое (Саяно-Байкальская горная область) / В. Г. Беличенко [и др.] ; отв. ред. Ф. А. Летников. – Новосибирск : Наука, 1988. – 161 с.

## **Lithological Composition of the Bottom Sediment in the Barrier Zone «River – Reservoir» (the Example of Bratsk Reservoir)**

G. A. Karnaukhova

**Abstract.** In this article the lithological composition of bottom sediments in a specific area of the barrier “river – reservoir”, formed under conditions of interrupted Angara cascade reservoirs. Analyzed the sources of precipitation-forming material in the barrier zone and its hydrological regime. The main types of sediment, contains data on their grain size and mineral composition.

**Keywords:** reservoir, barrier zone, bottom sediments, lithological composition.

*Карнаухова Галина Александровна*  
*доктор географических наук,*  
*научный сотрудник*  
*Институт земной коры СО РАН*  
*664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*  
*тел.: (3952) 42-71-82*

*Karnaukhova Galina Alexandrovna*  
*Doctor of Sciences (Geography),*  
*Research Scientist*  
*Institute of the Earth's crust SB RAS*  
*128, Lermontova st., Irkutsk, 664033*  
*tel.: (3952) 42-71-82*