DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10023

УДК 552.143:282.256.342/347
© Г.А.Карнаухова, 2019

Обстановки осадконакопления и особенности состава донных отложений в Ангарских водохранилищах

Г.А.КАРНАУХОВА (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН); 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128)

В пределах Ангарских водохранилищ основными обстановками осадконакопления являются три области – прибрежная, затопленных террас и русла р. Ангара, «река–водохранилище», – отражающие специфику осадкообразования в этих искусственных водоёмах и особенности состава донных отложений. Рассмотрены фракционный, минералогический и геохимический составы основных типов донных отложений в каждой обстановке осадконакопления. Установлено, что незначительные по площади прибрежная область и область «река–водохранилище» перехватывают основные потоки осадочного материала, что приводит к сосредоточению именно здесь наибольших по водохранилищам скоростей осадконакопления. Общий характер преобладания песчаных частиц в осадках прибрежной отмели и господство алевритового материала над пелитовой фракцией в осадках затопленных террас и русла Ангарских водохранилищ имеют сходство с распределением фракций, характерных для осадков оз. Байкал. Донные отложения специфической области «река–водохранилище» являются основными концентраторами химических элементов. В Ангарских водохранилищах, имеющих по геологическим масштабам незначительный период существования, наряду с фракционной сортировкой присутствуют минералогическая и геохимическая дифференциация осадочного материала.
Ключевые слова: обстановки осадконакопления, донные отложения, Ангарские водохранилища.

Карнаухова Галина Александровна
доктор географических наук



karnauh@crust.irk.ru

Depositional environments and composition features of bottom deposits in the Angara reservoirs

G.A.KARNAUKHOVA (Federal state budgetary institution of science Institute of the Earth's crust Siberian branch of the Russian Academy of Sciences)

Within the Angara reservoirs, three main areas of sedimentation are coastal areas, flooded terraces and the Angara river bed, as well as «river-reservoir», reflecting the specific features of sedimentation in these artificial reservoirs and composition features of bottom sediments.It has been established that the insignificant coastal area and the «river-reservoir» region intercept the main streams of sedimentary material, which leads to the concentration of sedimentation rates in the reservoirs. The general nature of the predominance of sand particles in the sediments of the coastal shoal and the dominance of the silty material over the pelite fraction in the sediments of the flooded terraces and the bed of the Angara reservoirs are similar to the distribution of fractions characteristic of the sediments of Lake Baikal. Bottom sediments of the specific area of the «river-reservoir» are the main concentrators of chemical elements. In the Angara reservoirs, with a short residence time within geological scales, along with fractional sorting, there is mineralogical and geochemical differentiation of the sedimentary material.
Key words: sedimentation conditions, bottom sediments, Angara reservoirs.

Водохранилища – природно-техногенные системы, осадконакопление в которых происходит в особых физико-географических обстановках и под влиянием иных, чем в естественных условиях факторов, сочетающих в себе как унаследованные от речных, так и приобретённые после создания искусственных водоёмов свойства. В водохранилищах все процессы происходят в режиме реального времени и во много раз быстрее, чем в природных водоёмах. Это позволяет проводить непосредственные наблюдения за формированием донных отложений, а также их эволюцией в зависимости от изменений внешних и внутренних условий, происхо-

дящих как в самих водоёмах, так и в пределах их водосборных бассейнов. Одним из наиболее уникальных и информативных объектов для исследований процессов современного осадконакопления служит природно-техногенная система с современным быстрым и сверхбыстрым осадконакоплением – Ангарские водохранилища, созданные на р. Ангара, вытекающей из оз. Байкал. Каскад включает Иркутское, Братское, Усть-Илимское и Богучанское водохранилища, время эксплуатации которых составляет, соответственно, 60, 50, 40 лет и 1 год (последнее в статье не рассматривается) (рис. 1).

Ангарские водохранилища относятся к одной из крупнейших в мире систем искусственных водоёмов, в которых заключено более 230 км^3 пресной воды при площади водного зеркала более 7500 км^2 и протяжённости с юга на север около 1,4 тыс. км. Водохранилища расположены на контакте двух геологических структур – Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны, являющихся областями активного поступления осадочного материала в водохранилища. Из-за нестабильности режима эксплуатации водохранилища продолжают находиться в стадии становления рельефа берегов и дна с активным проявлением абразионных процессов и поступлением большого объёма размытого материала.

Цель данной работы – исследование гранулометрического, минералогического и геохимического составов донных отложений в пределах основных обстановок осадконакопления, отражающих особенности осадкообразования в Ангарских водохранилищах.

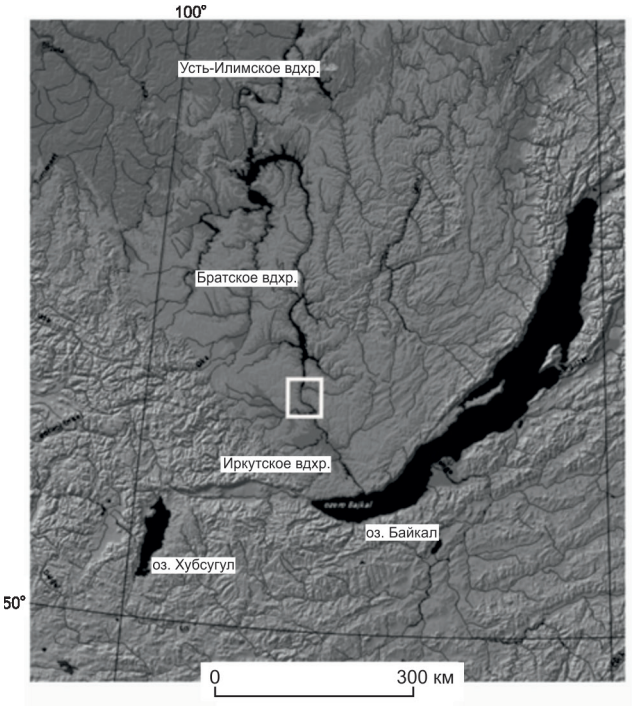


Рис. 1. Модель рельефа юга Восточной Сибири (SRTM):

белый квадрат – положение области «река–водохранилище»

Методы исследований. В период с 1972 по 2015 гг. в составе экспедиций Института земной коры СО РАН автором проводились комплексные исследования водохранилищ Ангарского каскада, в результате которых собран большой объём фактического материала по гранулометрическому, минералогическому и геохимическому составам, а также физическим свойствам донных отложений и пород береговой зоны водохранилищ, гидродинамическим условиям, миграции и накоплению химических элементов в этих водоёмах. В основу натурных исследований был положен методический принцип опорных участков и профилей, суть которого состояла в выделении репрезентативных участков на каждом из водохранилищ с учётом разнообразия природных условий, характера гидродинамики, состава и свойств пород береговой зоны. Все профили были привязаны к участкам наблюдений за формированием берегов водохранилищ. Такой метод даёт возможность включить в систему опробования большинство фациальных обстановок осадконакопления и форм надводного и подводного рельефа. Профильный отбор образцов пород, слагающих береговые уступы, донных отложений и проб воды выполнялся по 4 опорным профилям на Иркутском водохранилище, 34 – на Братском, 8 – на Усть-Илимском и 9 опорным и 5 дополнительным профилям в барьерной зоне «река–водохранилище». Для отбора образцов донных отложений на малых глубинах были задействованы грунтоотборники различных модификаций и дночерпатель. Глубже 2 м отбор образцов проводился с борта экспедиционного корабля грунтоотборной трубкой ПИ–27–II. Темпы осадконакопления определялись как балансовым методом, так и методом непосредственного зондирования слоя накопившихся отложений на опорных профилях при многоразовых детальных грунтовых съёмках, а на остальной акватории – геологическим методом деления мощности осадочного слоя на время, за которое слой образовался. Изучение перемещения осадочного материала и полей его концентрации в водной среде проводилось методом прямого отбора проб воды батометром Молчанова по тем же профилям и в тех же точках, что и отбор образцов донных отложений. Отбор проб осуществлялся на разрезах с поверхностного, срединного и придонного горизонтов. Гидродинамические условия, определяющие характер миграции осадочного материала, включали определения скоростей и направления перемещения воды на различных горизонтах с помощью морской вертушки ВММ, а также расчёты и построение гидродинамических моделей. В результате было опробовано более 5000 точек на дне водохранилищ, отобрано более 2900 образцов донных осадков, взято около 650 образцов пород из береговых уступов и около 700 образцов отложений прибрежных отмелей. Взято более 3500 проб воды.

В ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН были выполнены определения гранулометрического, минералогического и геохимического составов образцов донных отложений и проб воды, а также физических свойств донных осадков. Анализы проводились по общепринятым методикам с учётом требований и методических приёмов, используемых при литологических, геохимических, гидрохимических и инженерно-геологических анализах [1, 2, 8–10, 11–13]. Контроль результатов анализа образцов донных отложений и пород береговых уступов, а также проб воды осуществлялся методом сравнения с отечественными и международными стандартами.

Величина поступления в водохранилища осадкообразующего материала из оз. Байкал и твёрдый сток рек определялись отдельно для взвешенных и влекомых наносов. Для взвешенных наносов были использованы данные измерений их расходов. Сток влекомых наносов определён с помощью расчётных зависимостей, предложенных Г.И.Шамовым [14], которые дают хорошую сходимость с натурными наблюдениями.

Результаты и их обсуждение. Основными осадкообразующими источниками для водохранилищ Ангарского каскада являются их абразионные берега и речной сток, состав осадочного материала которых в областях сноса с Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны определяют породы 5 основных питающих терригенно-минералогических провинций. В южном и юго-западном обрамлении Сибирской платформы расположена одна питающая провинция нижнепротерозойских и архейских интрузивных образований Байкальской рифтовой зоны. На Сибирской платформе находятся четыре питающие провинции, представленные породами юрской системы осадочного чехла, надвинутого на фундамент Сибирской платформы, и развитыми в их поле четвертичными отложениями, а также породами кембрийской и ордовикской систем с четвертичными отложениями в их поле, и изверженными породами мезозоя. При общей протяжённости береговой линии водохранилищ около 7800 км на абразионные берега приходится более 2100 км, из которых при размыве пород юрской системы формируется 69 км подверженных абразии берегов, кембрийской – 519 км, ордовикской – 544 км, силурийской и каменноугольной – 393 км, в четвертичных отложениях – 716 км. Ежегодное поступление осадочного материала в водохранилища составляет более 227 млн. т, из них абразия берегов даёт 98,5% суммарного поступления. На долю абразионного материала в Иркутском водохранилище приходится 77,9, Братском – 98,8 и Усть-Илимском – 87,1% (табл. 1). Речной сток по величине приносимого материала значительно уступает поступлениям от размыва берегов. С водами рек в водохранилища ежегодно приносится около 2,7 млн. т. Главным образом материал поступает в форме взвесей и растворов. Влекомые наносы остаются в руслах и долинах рек. Малые притоки практически не влияют на осадочный процесс в водохранилищах. Ежегодно оз. Байкал поставляет 0,87 млн. т материала.

Основные процессы формирования комплекса донных отложений Ангарских водохранилищ происходят в трёх основных обстановках осадконакопления, таких как: прибрежная область, область затопленных террас и русла р. Ангара и область «река–водохранилище».

Прибрежная область включает прибрежные отмели и их подводный склон, образование которых происходит на участках водохранилищ, где генетическим типом формирующихся берегов является абразионный тип. Протяжённость области составляет более 2100 км, площадь – 75 км^2, то есть немногим более 1% общей площади водохранилищ [7].

1. Седиментационный баланс водохранилищ Ангарского каскада

Составляющие	Водохранилище						Сумма, млн. т в год
	Иркутское		Братское		Усть-Илимское		
	млн. т в год	%	млн. т в год	%	млн. т в год	%	
Приход							
Абразия пород береговых уступов	0,25	77,9	219,50	98,7	4,30	87,1	224,05
Вышерасположенный водоём	0,07	22,1	0,37	0,2	0,43	8,7	0,87
Боковая приточность	0	0	2,48	1,1	0,21	4,2	2,69
Сумма прихода	0,32	100	222,35	100	4,94	100	227,61
Расход							
Сброс в нижний бьеф	0,11	35,9	0,43	0,2	0,11	2,2	0,65
Взвеси в воде водохранилища	0,01	1,2	0,80	0,4	0,06	1,3	0,87
Донные отложения	0,20	62,9	221,12	99,4	4,77	96,5	226,09
Сумма расхода	0,32	100	222,35	100	4,94	100	227,61

Первый, самый активный этап дифференциации материала абразии берегов, осуществляемый волнами и ветро-волновыми течениями, начинается в пределах *прибрежных отмелей*. Наибольшей кинетической энергией обладают волны в верхних слоях воды, переносящие самые крупные фракции осадочного материала. Прибрежные отмели, занимая незначительную часть от общей площади водохранилищ, удерживают большие массы обломочного материала и являются областями сверхбыстрой седиментации. Так, при абразии суглинков до 50% размытого материала остаются вблизи питающего источника, формируя отмели шириной от 20 до 100 м. Слой отложений, ежегодно накапливающихся на отмели, может достигать 80 см и представлен в основном крупными алевритами. Абразия аргиллитов приводит к аккумуляции в основном щебнисто-песчаного материала с пелитовым заполнителем со скоростью 30 см/год. Ширина отмели составляет 10–30 м. При абразии песчаников более 50% размытого материала отлагаются в прибрежной зоне, формируются отмели песчаного состава шириной более 40 м. Темп аккумуляции песка составляет 20–90 см/год.

Гидродинамические условия на различных участках прибрежных отмелей вместе с составом и свойствами абразионного материала определяют набор минералов, химических элементов и соединений, а также их количественное соотношение. Наиболее типичными в осадках являются фракции 0,25–0,05 и 0,05–0,01 мм, составляющие в сумме более 65%, то есть преобладающим является песчано-алевритовый материал (рис. 2), формирующий основные типы осадков – пески и крупные алевриты [6]. На отмелях активно накапливаются кварц (55,9%) и полевые шпаты (33,5%), выносятся же обладающие высокой плавучестью слюды (11,9%) и устойчивый минерал циркон (см. рис. 2). Донные отложения обогащены ассоциацией минералов с большой плотностью (в %): рудными минералами – 27,8, гранатами – 12,6, эпидотом – 11,7, сфеном – 1,2. Песчаные отложения сложены преимущественно зёрнами кварца, присутствует немного полевых шпатов и мало слюд. В крупных алевритах доля кварца снижается, становится весьма значимым присутствие обломков агрегатов. Рудные минералы и гранаты являются минералами-индикаторами осадконакопления на прибрежных отмелях водохранилищ.

Периодические поступления на прибрежные отмели во время штормов дополнительных порций осадочного материала абразионного происхождения, перемещаемого и сортируемого волнами и течениями, способствуют накоплению широкого спектра элементов в этой зоне осадконакопления. В осадках отмели остаётся в среднем за год (в %): органического вещества – >8, железа – около 12 и фосфора – 17, микроэлементов – 24 (табл. 2). Быстрее из взвесенесущего потока выпадают Mn, Ni, Cr, Zn, V. Содержание в осадках составляет (в мг/кг): Ni – 44, Cr –150, Zn – 62, V – 112, а Mn – 0,81 г/т (см. рис. 2). В отложениях отмели наблюдаются устойчиво повышенные концентрации обладающего малой растворимостью хрома, который явно тяготеет к осадкам с высоким содержанием песчаной фракции и осаждается в составе гранатовых зёрен. Наибольший коэффициент концентрации хрома представлен на урезе и вблизи внешнего края отмели. И далее по профилю у элемента сохраняется связь с песчаной фракцией. В крупных алевритах ведущим является V, резко возрастает содержание Ni и Pb. Крупные алевриты более ожелезнены и более обогащены марганцем по сравнению с песками, в то же время по концентрации органического вещества и фосфора осадки различаются незначительно (см. рис. 2).

На внешнем крае отмели высота слоя отложений периодически уменьшается за счёт гравитационного перемещения материала по *подводному склону* к его подножию, называемому также свалом глубин. Возникновению гравитационного перемещения способствуют высокие скорости накопления осадков на внешнем крае отмели, резкое увеличение уклона, слабоуплотнённое состояние осадков. При воздействии волн нарушается устойчивость материала и его перемещение по подводному склону отмели. Мощность осадков на подводном склоне составляет от 1 до 40 см, а основными типами донных отложений являются крупные алевриты и мелкоалевритовые илы. Содержание алевритовой фракции увеличивается до 43,1%, количество песчаных частиц в осадке является наименьшим по профилю (23,0%) (см. рис. 2). Среднее значение медианного диаметра донных отложений равно 0,041 мм, коэффициент сортированности – 2,83. На подводном склоне в осадках уменьшается количество ведущих на прибрежных отмелях минералов – кварца, роговой обманки. Снижается содержание калишпатов с 22,7 до 15,4% на отмели, ильменит+магнетита – до 20,2%. Здесь выпадает и концентрируется большая часть минералов тяжёлой фракции, особенно заметно повышение количества эпидота (12,4%) и устойчивых минералов – циркона (8,3%), турмалина (1%), рутила (1,5%), являющихся минералами-индикаторами накопления на подводном склоне. Характерным для осадков подводного склона отмели является значимое сокращение содержания элементов, лидирующих в осадках отмели. Особенно заметно уменьшились концентрации (в мг/кг): Cr до 99, Ni – 26, V – 83, а Mn – 0,41г/т. При этом отмечается определённый рост количества Pb (19 мг/кг), обусловленный его связью с тонкодисперсными осадками. Преобладание в осадках крупноалевритовой фракции способствует активному накоплению органического вещества (9,1%) и некоторому увеличению содержания Fe (2,17%) (см. рис. 2).

Область затопленных террас и русла р. Ангара расположена в пределах действия низкоэнергетических гидродинамических процессов. По литодинамическим условиям затопленные террасы и русло

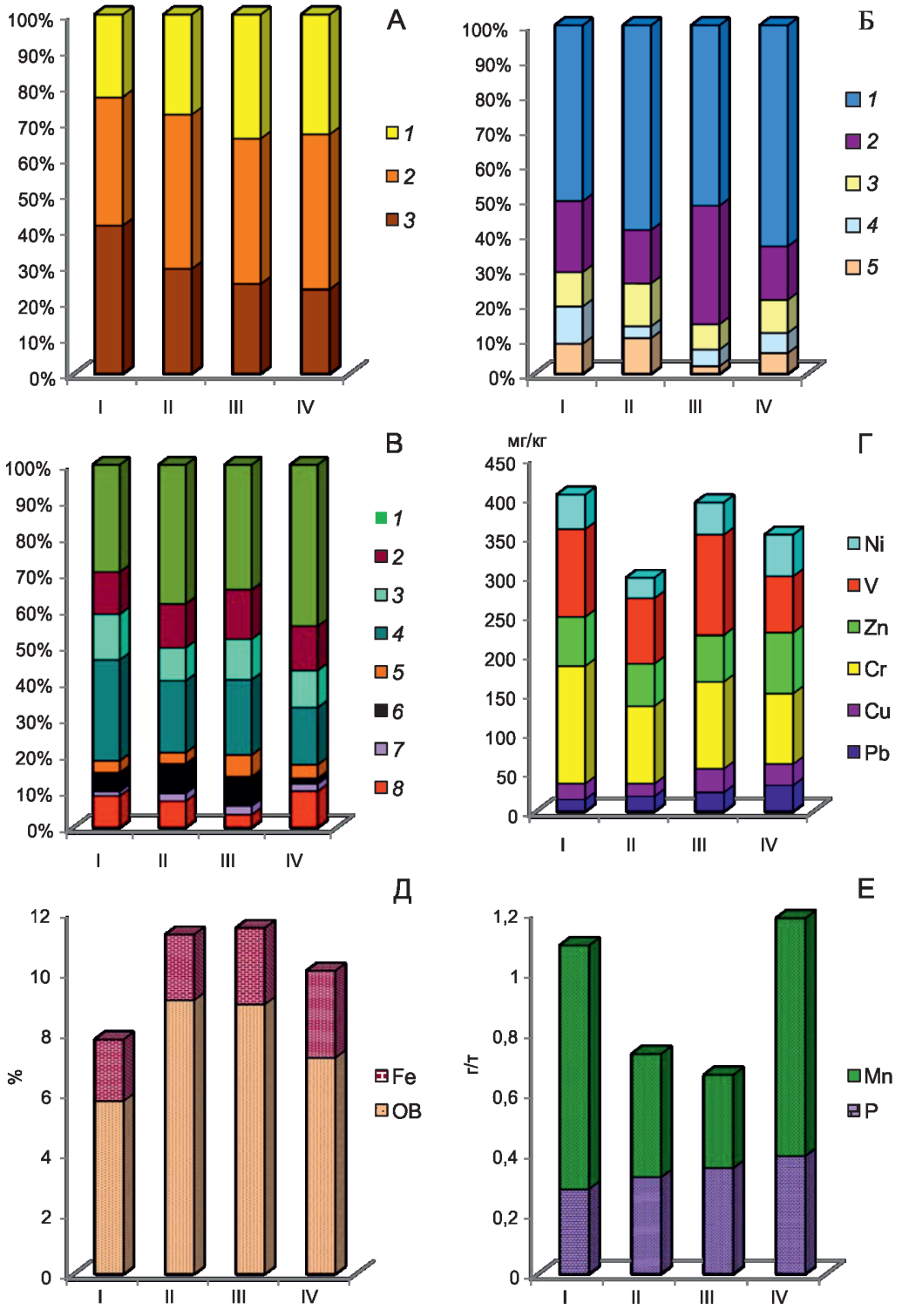


Рис. 2. Состав донных отложений в прибрежной области и области затопленных террас и русла р. Ангара:

прибрежная область: I – прибрежная отмель, II – подводный склон прибрежной отмели; область затопленных террас и русла: III – затопленные террасы, IV – затопленное русло р. Ангара; *фракционный состав*: А – фракции донных осадков (в %): *1* – пелитовая, *2* – алевритовая, *3* – песчаная; *минералогический состав*: Б – минералы лёгкой фракции (в %): *1* – кварц, *2* – калишпаты, *3* – плагиоклазы, *4* – слюды, *5* – обломки пород, агрегаты; В – минералы тяжёлой фракции (в %): *1*– роговая обманка, *2* – эпидот, *3* – гранаты, *4* – рудные (ильменит+магнетит), *5* – пироксены, *6* – циркон, *7* – сфен, *8* – прочие; *геохимический состав*: Г– микроэлементы (в мг/кг), Д – органическое вещество, железо (в %), Е – марганец, фосфор (в г/т)

2. Поступление и удержание осадочного материала и его составляющих в ЛГБЗ

ЛГБЗ «берег–водохранилище»				ЛГБЗ «река–водохранилище»			
Составляющие	Поступление, тыс. т/год	Удержание		Составляющие	Поступление, тыс. т/год	Удержание	
		тыс. т/год	%			тыс. т/год	%
Абразия, в том числе:	224 050	145 632,5	65,0	Речной сток, в том числе:	1 800	1152	64
ОВ	18 163	1 471,2	8,1	ОВ	220	198	90
МЭ	102,0	24,5	24	МЭ	3,5	2,38	68
железо	513,8	11,8	2,3	железо	3,6	2,98	83
фосфор	17,6	3,0	17,0	фосфор	2,0	2,0	100

входят в зону седиментации, недоступную для непосредственного активного воздействия волнового фактора, где скорости течений снижаются иногда до нулевых значений. Миграцию осадочного материала во взвешенном состоянии осуществляют дрейфовые, компенсационные и стоковые течения. Такой скоростной режим благоприятен для агрегирования частиц и осаждения терригенных взвесей и их аккумуляции на почвенном горизонте *затопленных террас*, прикрывающем террасовые фации аллювия. Образующиеся современные донные отложения имеют плохую сортированность (коэффициент сортировки до 4,89). Они представлены в основном крупными алевритами, мелкоалевритовыми и алевритово-глинистыми илами, высота слоя которых может быть в пределах 0,1–14 см. В минеральном составе осадков лидирует лёгкая фракция, содержание кварца в ней составляет 51,8%. В донных осадках затопленных террас, занимающих весьма значительные площади дна водохранилищ, вынесенные за пределы отмелей и их подводных склонов, нестойкие по отношению к истиранию полевые шпаты (41,3%), среди которых преобладают калишпаты (34%), замещают кварц. Ведущий минерал в тяжёлой фракции – роговая обманка (34,4%). Однако её количество уступает содержанию в осадках затопленного русла. Характерным для донных отложений становится комплекс, представленный (в %): эпидотом – 13,7, гранатами – 11,2, сфеном – 2,4 и цирконом – 8,1, при этом происходит сокращение содержаний турмалина и рутила (см. рис. 2). С этим комплексом минералов связано повышение в донных осадках Pb и Cu. Для мелкодисперсных осадков свойственно многокомпонентное накопление элементов с ростом их концентрации по сравнению с таковыми осадками прибрежной части водохранилищ. Здесь находится второй максимум содержания микроэлементов, активно накапливающихся в мелкоалевритовых илах, составляя (в мг/кг): Pb – 24, Cu – 30, Cr – 111, Zn – 59, V – 128, Ni – 41. В целом складываются благоприятные условия для осаждения железа, фосфора и органического вещества.

В *затопленном русле* происходит осаждение рассеянного взвешенного материала, перемещаемого слабыми стоковыми течениями, или же при их нулевых значениях – прямое осаждение терригенной взвеси. На русловом аллювии, состоящем из гальки, гравия и песка, формируется комплекс современных донных отложений, представленных крупными алевритами, мелкоалевритовыми и алевритово-глинистыми илами, которые отложились на русловом аллювии или внедрились в него. Медианный диаметр изменяется от 0,008 у алевритово-глинистых илов до 0,369 у песков. Мощность крупных алевритов достигает 1,5–17, мелкоалевритовых илов – 1–25 и алевритово-глинистых илов – 5–10 см. Коэффициент сортированности осадков составляет от 2,28 до 5,00 и выше. В лёгкой фракции донных отложений ведущим минералом является кварц (63,5%). Отмечается значительный рост (на 11,7%) его содержания по сравнению с содержаниями осадков затопленных террас. При этом резко снижается (на 18,7%) количество калишпатов и возрастает насыщенность плагиоклазом (на 2,2%). В осадках затопленного русла понижены содержания эпидота (12,3%), имеющего низкую терригенно-минералогическую миграционную способность, и минералов с высокой плотностью (в %): гранатов – 10,2, циркона – 1,5, рудных минералов – 15,7 [4, 5]. Снижение содержания этих минералов повлекло уменьшение концентрации ванадия с 128 до 72 мг/кг на затопленных террасах. Меньшие, чем у природных водоёмов, размеры водохранилищ позволяют нестойкой роговой обманке перемещаться от питающего источника и концентрироваться в затопленном русле (44,5%) одновременно с осаждением обладающих высокой плавучестью хлорита и биотита, что отразилось в росте концентрации цинка (77 мг/кг). В целом для затопленного русла с его слабой гранулометрической сортированностью осадков характерны низкоконтрастные концентрации микроэлементов (см. рис. 2). В затопленном русле отмечается повышенное содержание обладающего высокой миграционной способностью Fe (2,87%), большая часть которого находится в водохранилищах в карбонатной форме. Значения pH среды и

концентрация кислорода позволяют глинистым минералам сорбировать железо, что выражается в появлении максимума его содержания в мелкоалевритовых и алевритово-глинистых илах затопленного русла [4]. На ведущую роль механического осаждения элементов в составе взвесей указывает и тяготение к этим типам осадков: Mn – 0,79 и P – 0,39 г/т, Ni – 53, Zn – 77 и Pb – 33 мг/кг.

Формирование области ***«река–водохранилище»*** связано с прерыванием каскадности между Иркутским и Братским водохранилищами. Протяжённость области составляет более 90 км, площадь – 135 км^2. В её структуру входят подобласти переменного подпора по р. Ангара и постоянного подпора, представленного Верхнеангарским районом Братского водохранилища [3]. В области «река–водохранилище» происходят процессы активного преобразования осадочного материала, поступающего в составе твёрдого стока р. Ангара и её притоков – рек Иркут, Китой и Белая. В данной области, занимающей 1,8% площади водохранилищ, задерживается около 64% твёрдого речного стока притоков, впадающих в водохранилища (см. табл. 2). Среднегодовая величина поступления осадкообразующего материала составляет более 1,8 млн. т, из которых около 77% приносятся во взвешенном состоянии и 23% – волочением. Основной вклад (72%) в питание осадочным материалом вносит р. Ангара, притоки же ежегодно поставляют около 0,5 млн. т. Поступивший материал попадает в условия пониженных скоростей потока, в которых способность этого потока транспортировать материал резко сокращается, и поступающий материал создаёт так называемое «первичное тело заиления» типа эстуария. В области «река–водохранилище» удерживается ежегодно (в %): поступающего органического вещества – 90, фосфора – 100, соединений железа – 83 и микроэлементов – 68 (см. табл. 2).

Основные структурные типы донных отложений в области – галька, песок, крупные алевриты, мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы (рис. 3). Распределение донных осадков по длине области происходит в соответствии со скоростным режимом водного потока. Каждый тип осадка занимает определённый участок на дне с наиболее благоприятными для его осаждения гидродинамическими условиями. Одновременно происходит минералогическая и геохимическая дифференциация осадков. При поступлении осадочного материала вначале активно осаждаются минералы с высоким удельным весом в составе песчано-алевритового материала. Здесь находится поле с максимумом содержания тяжёлых минералов в донных осадках водохранилищ Ангарского каскада. По сравнению с водохранилищами донные осадки области наиболее обогащены химическими элементами и их соединениями, максимальным является и содержание эпидота. По степени обособления донных осадков по гранулометрическому, минералогическому и геохимическому составам область подразделяется на три подзоны.

Верхняя подзона включает участки I, II и III. Скорость течения р. Ангара перед зоной составляет от 1,4 до 2,5 м/с. При поступлении водного потока в верхнюю подзону его скорость снижается от 0,9 до 0,29 м/с, способствуя гравитационному осаждению материала, переносимого водным потоком. При скорости течения 0,9–0,5 м/с происходит аккумуляция гравийно-галечного материала и крупнозернистого песка, при скорости 0,52–0,29 м/с осаждаются тонкозернистые пески. Пески образуют сплошной покров, в котором присутствуют пятна крупных алевритов и мелкоалевритовых илов толщиной до 1–2 см. По минеральному составу тяжёлой фракции донные осадки относятся к амфибол-рудной подпровинции. Для тяжёлой фракции, доля которой составляет 0,7–2,3%, характерны высокие содержания (в %): роговой обманки – 36,4, рудных минералов – 18,2, граната – до 15,6 и эпидота – 12,8 (см. рис. 3). Количество кварца в лёгкой фракции осадков составляет в среднем 60, а полевых шпатов – 17,4%. Кроме того, присутствуют слюды – 12,4 и минеральные агрегаты – 10,2% [7]. Из водного потока в составе осаждающегося материала выводится большая часть приносимых элементов. Наиболее активно в донные осадки переходят свинец, хром, ванадий, железо и органическое вещество. Содержание элементов составляет: Pb – до 80, Cr – 170–180 и V – свыше 130 мг/кг, Fe – 6,8−9,4 и органического вещества – до 10,8%, P – до 2,9 г/кг (см. рис. 3).

Средняя подзона включает участки с IV по VII. Скоростное поле в пределах подзоны, составляя 0,29–0,27 м/с, способствует седиментации крупноалевритового материала, а при скоростях 0,27–0,22 м/с – мелкоалевритовых илов. Наибольшая мощность слоя отложившихся крупных алевритов доходит до 9, местами до 32 см, мелкоалевритовых илов изменяется от 4 до 25 см. По минеральному составу тяжёлой фракции донные осадки относятся к рудно-гранатовой и верхней части амфибол-эпидотовой подпровинций. Донные отложения обогащены минералами лёгкой фракции, составляющей до 90% осадка, основными из которых на участках IV−V являются кварц – около 43 и полевые шпаты – 13,6%. Ниже по подзоне (участки VI–VII) происходит активное выпадение слюд – 24,1 и минеральных агрегатов – 19,3%. Последние состоят в основном из глинистых минералов, представленных гидрослюдой, хлоритом, каолинитом и смектитом. В донных осадках подзоны тяжёлая фракция наиболее разнообразна по набору минералов, к ведущим из которых относятся (в %): рудные (ильменит+магнетит) – 42,7–52,1, гранаты – 18,9–28,9 и эпидот – 13,3–29,5. В пределах подзоны происходит самая активная по барьерной области садка меди, ванадия, никеля. Концентрация элементов в донных осадках составляет (в мг/кг): Cu – 160, V – 130−170, Ni – 120−140, Zn – 120. Количество органического вещества колеблется в

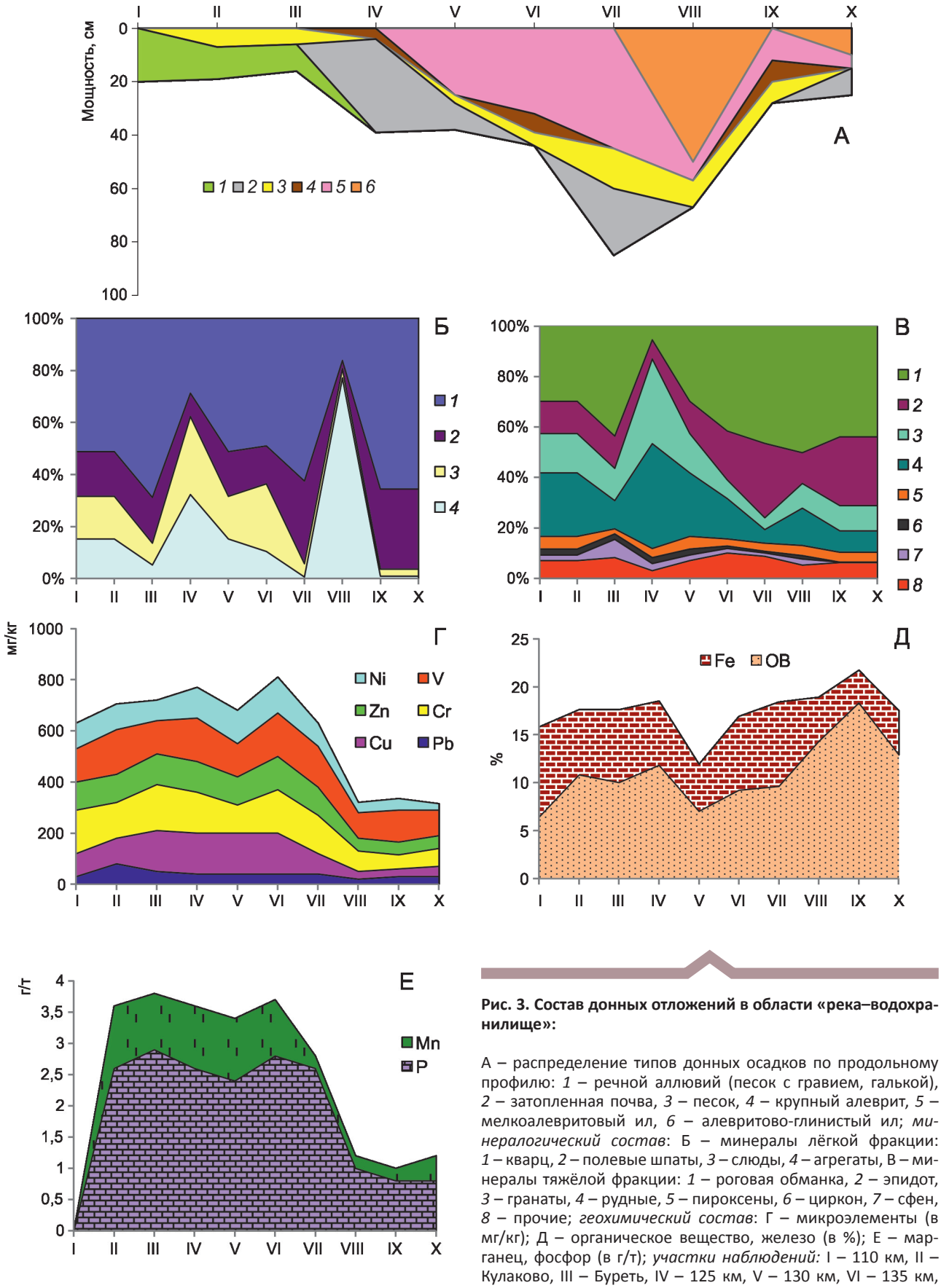


Рис. 3. Состав донных отложений в области «река–водохранилище»:

А – распределение типов донных осадков по продольному профилю: *1* – речной аллювий (песок с гравием, галькой), *2* – затопленная почва, *3* – песок, *4* – крупный алеврит, *5* – мелкоалевритовый ил, *6* – алевритово-глинистый ил; *минералогический состав*: Б – минералы лёгкой фракции: *1* – кварц, *2* – полевые шпаты, *3* – слюды, *4* – агрегаты, В – минералы тяжёлой фракции: *1* – роговая обманка, *2* – эпидот, *3* – гранаты, *4* – рудные, *5* – пироксены, *6* – циркон, *7* – сфен, *8* – прочие; *геохимический состав*: Г – микроэлементы (в мг/кг); Д – органическое вещество, железо (в %); Е – марганец, фосфор (в г/т); *участки наблюдений:* I – 110 км, II – Кулаково, III – Буреть, IV – 125 км, V – 130 км, VI – 135 км, VII – Свирск, VIII – Каменка, IX – Казачье, X – Середкино

пределах 7,0–11,8% и примерно соответствует таковому в первой подзоне. Происходит некоторая активизация выпадения фосфора (2,6 г/т) при снижении в осадках количества железа в среднем до 7%.

В *нижнюю подзону* входят участки с VIII по X. Отмечается дальнейшее снижение транспортирующей скорости водного потока, что является наиболее благоприятным условием для седиментации тонкодисперсных частиц и формирования осадков со значительным содержанием пелитовой фракции. Донные осадки представлены мелкоалевритовыми и алевритово-глинистыми илами. Мощность слоя мелкоалевритовых илов составляет от 4 до 45 см, алевритово-глинистых – 10–50 см. По минеральному составу тяжёлой фракции донные осадки относятся к амфибол-эпидотовой подпровинции, для которой характерно самое высокое в зоне содержание минералов тяжёлой фракции – 55,1%. Ведущие минералы во фракции – роговая обманка (46,1%), эпидот (24%). В осадках значительно сократилось количество (в %): рудных минералов – 9,3, пироксенов – 3,8, циркона – 0,5, сфена – 1,0. В лёгкой фракции ведущим является кварц (51,5%), затем полевые шпаты (23,9%). В пределах подзоны особо выделяются донные отложения на участке Каменка, состоящие на 99,9% из минералов лёгкой фракции с преобладанием в ней глинистых минералов (58,4%) [7]. По сравнению с вышележащими подзонами осадки на участках с VIII по X значительно обеднены элементами. Содержание Pb, Cr, Zn, Ni, P и Fe снизилось в 2 раза, а Cu и Mn в 3–5 раз. В меньшей мере упала концентрация ванадия. При этом произошла активизация осаждения органического вещества (см. рис. 3).

Таким образом, в пределах Ангарских водохранилищ основными обстановками осадконакопления являются три области – прибрежная, затопленных террас и русла р. Ангара, «река–водохранилище», отражающие специфику осадкообразования в этих искусственных водоёмах. Незначительные по площади прибрежная область и область «река–водохранилище» перехватывают основные потоки осадочного материала, что приводит к сосредоточиванию именно здесь наибольших по водохранилищам скоростей осадконакопления. Общий характер преобладания песчаных частиц в осадках прибрежной отмели и господство алевритового материала над пелитовой фракцией в осадках затопленных террас и русла Ангарских водохранилищ имеют сходство с распределением фракций, характерным для осадков оз. Байкал. Донные отложения специфической области «река–водохранилище» являются основными концентраторами химических элементов. В Ангарских водохранилищах, имеющих по геологическим масштабам незначительный период существования, наряду с фракционной сортировкой отмечены минералогическая и геохимическая дифференциация осадочного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00194-а; № 14-05-00079-а; № 18-05-00101-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во МГУ, 1961.
2. *Ветров В.А., Кузнецова А.И.* Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ, 1997.
3. *Карнаухова Г.А.* Седиментационная система реки Ангары после зарегулирования стока // ДАН. 2007[а]. Т. 413. № 4. С. 507–509.
4. *Карнаухова Г.А.* Литолого-геохимическая дифференциация донных отложений водохранилищ Ангарского каскада // Геохимия. 2007[б]. № 4. С. 439–449.
5. *Карнаухова Г.А.* Поясность осадконакопления в водохранилищах Ангарского каскада // Геохимия. 2011. № 6. С. 634–647.
6. *Карнаухова Г.А*. Прибрежная зона осадконакопления в ангарских водохранилищах // Изв. ИГУ. Серия «Науки о Земле». 2014. Т. 10. С. 67–77.
7. *Карнаухова Г.А*., *Сковитина Т.М.* Обстановки формирования минерального состава донных отложений в барьерной зоне реки Ангары // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 2. С. 165–177.
8. *Логвиненко Н.В*., *Сергеева Э.И.* Методы определения осадочных пород: Учебное пособие для вузов. – Л.: Недра, 1986.
9. *Ломтадзе В.Д.* Методы лабораторных исследований физико-химических свойств горных пород. – Л.: Недра, 1972.
10. *Метод* масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в применении к элементному составу глубинной байкальской воды / В.Н.Эпов, Е.Н.Эпова, А.Н.Сутурин, А.Р.Семенов // Аналитика и контроль. 2000. № 4(2). С. 202–208.
11. *Методы* палеогеографических реконструкций (при поисках залежей нефти и газа) / В.А.Гроссгейм, О.В.Бескровная, И.Л.Геращенко и др. – Л.: Недра, 1984.
12. *Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н.* Методы исследования качества воды водоемов. – М.: Медицина, 1990.
13. *Унифицированные* методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю.Лурье. – М.: Наука, 1973.
14. *Шамов* Г.И. Речные наносы. – М.: Гидрометеоиздат, 1959.