

## Геохимический состав донных отложений Ангарских водохранилищ

Карнаухова Г.А., Штельмах С.И.

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, karnauh@crust.irk.ru; fotina78@gmail.com*

**Аннотация.** Формирование геохимического состава донных отложений Ангарских водохранилищ определяется главным образом составом материала, слагающего абразионные берега, и гидродинамическими условиями, влияющие на процессы абразии, миграции и аккумуляции осадочного материала. Направленность осадочной дифференциации донных отложений развивается по тем же законам, что и в природных водоемах. Ведущими являются процессы осадконакопления элементов терригенного ряда, образование которых связано с продуктами разрушения горных пород, слагающих абразионные берега водохранилищ. Концентрация элементов в донных осадках зависит от состава материала питающих источников, гидродинамической активности, времени пребывания элементов в воде и химических показателей воды водохранилищ. Происходит дифференциация донных отложений по геохимическому составу по морфодинамическим зонам.

На прибрежных отмелях с активной гидродинамикой и высокими скоростями осадконакопления отмечается наибольшая аккумуляция  $\text{SiO}_2$ , карбонатов  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ . В донных отложениях глубоководной зоны более активно накапливаются  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ , а также микроэлементы.

**Ключевые слова:** Ангарские водохранилища, донные отложения, геохимический состав.

## Geochemical composition of the bottom sediments of the Angara reservoirs

Karnaukhova G.A., Shtel'makh S.I.

*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, karnauh@crust.irk.ru; fotina78@gmail.com*

**Abstract.** The formation of the geochemical composition of bottom sediments of the Angara reservoirs is determined mainly by the composition of the material that makes up the abrasion banks and the hydrodynamic conditions that affect the processes of abrasion, migration and accumulation of sedimentary material. The direction of sedimentary differentiation of the bottom sediments develops according to the same laws as in natural water bodies. Leading processes are sedimentation processes of the terrigenous series elements, which formation is associated with products of the rocks destruction that make up the abrasion banks of reservoirs. The concentration of elements in the bottom sediments depends on the composition of the source material, hydrodynamic activity, residence time of elements in water and chemical parameters of reservoir water. Differentiation of bottom sediments occurs according to geochemical composition in morphodynamic zones.

The greatest accumulation of  $\text{SiO}_2$ , carbonates  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  is noted on coastal shallows with active hydrodynamics and high sedimentation rates.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$ , as well as microelements, are more actively accumulated in the bottom sediments of the deep water zone.

**Keywords:** Angara reservoirs, bottom sediments, geochemical composition.

### Введение

Состав осадкообразующего материала и физико-географические условия среды осадконакопления в Ангарских водохранилищах, определяя процессы абразии, аккумуляции, миграции и дифференциации осадочного материала, формируют его геохимический состав, который не утрачивает связь с исходным материалом. Ведущими являются процессы осадконакопления элементов терригенного ряда, образование которых связано с продуктами разрушения горных пород суши, слагающих абразионные берега водохранилищ. Распределение и концентрация элементов в донных осадках зависит от состава материала питающих источников, гидродинамической активности и химических показателей воды водохранилищ.

### Материалы и методы

В статье представлены результаты многолетних полевых и аналитических исследований процессов осадкообразования и становления состава и свойств донных осадков в Ангарских водохра-

нилищах, проводимых Институтом земной коры СО РАН в период с 1972 по 2021 гг. Полевые исследования включали ежегодный профильный отбор образцов донных отложений грунтоотборными трубками и грунтоотборниками, отбор образцов пород, слагающих береговые уступы, отбор проб вод батометром Молчанова, измерения скорости и направления течений. Основными методами определения геохимического и литологического состава образцов донных отложений являлись лабораторно-аналитические, выполненные в ЦКП «Геохронология и геодинамика» ИЗК СО РАН по общепринятым методикам с учетом требований и методических приемов, используемых при литологических и геохимических исследованиях (Иванова и др., 1974; Гроссгейм и др., 1984; Ревенко, 2010; Пантеева и др., 2011).

В таблицах приведены осредненные данные после лет эксплуатации водохранилищ: Иркутского – 60, Братского – 50, Усть-Илимского – 40.

### Результаты и обсуждение

Состав осадкообразующего материала и физико-географические условия среды осадконакопления в Ангарских водохранилищах, определяя процессы разноса и дифференциации осадочного материала, формируют его геохимический состав, который не утрачивает связь с исходным материалом. Преобладающей формой элементов, находящихся в донных отложениях водохранилищ, является геохимически инертная, поскольку ведущими являются процессы осадконакопления элементов терригенного ряда, формирующие донные отложения, представленные, главным образом, классом обломочных осадков, образование которых связано с разрушением горных пород суши. Основными типами донных отложений являются пески, крупные алевриты, мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы.

По концентрации элементов основного состава главенствующее положение в донных отложениях занимает  $\text{SiO}_2$ , т.е. для водохранилищ характерным является силикатный тип осадконакопления (табл. 1). Донные осадки Ангарских водохранилищ обогащены  $\text{SiO}_2$ , количество элемента в осадках соответствует его содержанию в осадочных породах суши, поступающих в водоем при абразии и в составе речного стока. Ведущее положение кремнезема среди полуторных окислов в донных осадках Ангарских водохранилищ делает эти осадки похожими на донные отложения как Волжского и Днепровского каскадов водохранилищ, так и озера Байкал. Разброс в содержании  $\text{SiO}_2$  по типам осадков в водохранилищах невелик, большая часть осадков с наибольшим содержанием  $\text{SiO}_2$  сосредоточена на участках, имеющих наибольшее площадное распространение крупнозернистых осадков. Максимум приходится на пески, слагающие прибрежные отмели водохранилищ. Наименьшее содержание  $\text{SiO}_2$  имеют мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы, залегающие за пределами отмелей и включающие значительное количество пелитовых частиц.

Таблица 1. Среднее содержание основных элементов в донных отложениях Ангарских водохранилищ.

Table 1. Average content of microelements in the bottom sediments of the Angara reservoirs.

| Водохранилище | Элементы основного состава, % |                         |              |              |                         |                 |                 |                 |
|---------------|-------------------------------|-------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|               | Окислы                        |                         |              |              |                         | Карбонаты       |                 |                 |
|               | $\text{SiO}_2$                | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{CaCO}_3$ | $\text{MgCO}_3$ | $\text{FeCO}_3$ |
| Иркутское     | 63.6                          | 5.85                    | 4.98         | 3.74         | 3.14                    | 5.08            | 3.90            | 5.10            |
| Братское      | 74.4                          | 4.92                    | 4.35         | 3.81         | 3.19                    | 8.95            | 5.59            | 5.40            |
| Усть-Илимское | 69.1                          | 4.05                    | 3.18         | 1.71         | 2.22                    | 10.54           | 2.66            | 4.27            |

Уменьшение в донных отложениях водохранилищ количества  $\text{SiO}_2$  сопровождается ростом концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с преобладанием в составе тонкодисперсной фракции, т.е. там, где концентрируются глинистые минералы. Наиболее богаты алюминием мелкоалевритовые илы головного в каскаде – Иркутского водохранилища, что обусловлено существенным его притоком из озера Байкал в составе каолинита, а также размывом берегов, сложенных породами юры и четвертичными су-

глинками. В Братское и Усть-Илимское водохранилища основное поступление  $Al_2O_3$  происходит в составе абразионного материала, активнее насыщены алюминием донные отложения глубоководной зоны на участках размыва берегов, сложенных суглинками с большим количеством глинистых минералов. Существует тесная связь с рельефом водоемов и размерностью фракций осадочного материала, выраженная в резком снижении количества алюминия в осадках гидродинамически активных зон – прибрежных отмелей и затопленных бывших островов.

Высокие содержания щелочноземельных окислов CaO и MgO в донных осадках, с преобладанием CaO, обусловлены активным поступлением в составе абразионного материала, особенно на участках размыва пород юры в береговой зоне Иркутского и кембрийских пород верхней части Братского водохранилища. Для них характерно, как и для большей части полторных окислов, снижение количества в донных отложениях от Иркутского водохранилища к Усть-Илимскому. Более активно CaO и MgO аккумулируются в мелкоалевритовых и алевритово-глинистых илах глубоководной зоны и резко снижается количество в осадках прибрежной части водохранилища.

Карбонаты донных отложений по химическому составу представлены  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $FeCO_3$ , в основном преобладает  $CaCO_3$ . Более обогащены карбонатами донные осадки срединного в каскаде – Братского водохранилища. Наибольшее суммарное накопление карбонатов  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$  происходит при высоких скоростях осадконакопления на прибрежных отмелях водохранилищ и их подводных склонах, где  $CaCO_3$  подавляет другие карбонаты, т.е. чем выше содержание в осадке фракции 0.1–0.01 мм, тем выше содержание  $CaCO_3$ . В затопленном русле, где скорости придонных течений в расширениях Братского и Усть-Илимского водохранилищ лежат в пределах величин, близких к нулю, в осадках с высоким содержанием пелитовых частиц отмечается активизация накопления  $FeCO_3$  и его преобладание среди карбонатов. Обогащение осадков  $FeCO_3$  делает их фациально схожими с осадками озер.

Основными источниками микроэлементов являются абразионные берега водохранилищ, речной сток, поступление из озера Байкал и вышерасположенных водохранилищ. Концентрации микроэлементов в донных отложениях Ангарских водохранилищ (табл. 2) значительно ниже кларковых концентраций в литосфере. Донные отложения довольно бедны микроэлементами по сравнению с другими водохранилищами и природными водоемами. Изменения концентрации элементов в осадках связано не только с интенсивностью питающих источников, но и с их миграционной способностью, приводящей к дифференциации по типам осадков.

Таблица 2. Среднее содержание микроэлементов в донных отложениях Ангарских водохранилищ.

Table 2. Average content of microelement in the bottom sediments of the Angara Reservoirs.

| Водохранилище | Микроэлементы, мкг/кг |    |    |    |     |    |    |     |
|---------------|-----------------------|----|----|----|-----|----|----|-----|
|               | Ni                    | Zn | Cu | Pb | Mn  | V  | Co | Cr  |
| Иркутское     | 38                    | 40 | 8  | 16 | 430 | 38 | 3  | 65  |
| Братское      | 74                    | 90 | 29 | 27 | 500 | 96 | 17 | 130 |
| Усть-Илимское | 40                    | 40 | 26 | 21 | 530 | 91 | 38 | 87  |

Удаление марганца из воды Ангарских водохранилищ происходит на взвешенных тонкопелитовых частицах, сосаждение совместно с органическим веществом (ОВ) не проявляется, что косвенно свидетельствует о преобладании элемента в минеральной фазе. Распределение марганца от песков к алевритово-глинистым илам идет в Братском водохранилище по схеме: 400-330-300-400 мг/кг при фоновом содержании в отложениях водохранилищ 350 мг/кг (Карнаухова и др., 1988). Увеличение марганца в алевритово-глинистых илах коррелируется с высокими положительными значениями окислительно-восстановительного потенциала, при которых марганец иловых и придонных вод, окисляясь и гидролизуясь, накапливается в донных отложениях. Другой максимум элемента приходится на пески прибрежных отмелей в основном на участках размыва в береговых уступах аргиллитов и песчаников. Насыщение прибрежных песков марганцем обусловлено выпадением его из взвеси с обломками минералов, в составе которых находится элемент.

Для донных отложений Иркутского и Усть-Илимского водохранилищ характерны нижефоновые концентрации элемента. Выше фона накопление цинка отмечается в донных отложениях области переменного подпора Братского водохранилища, на участке перехода от речных к водохранилищным условиям, где элемент имеет явно техногенное происхождение. Ниже, в Балаганском расширении Братского водохранилища, цинк поступает в донные осадки в основном в составе роговой обманки, магнетита и биотита, которые в повышенных концентрациях находятся в породах верхленской свиты кембрия, слагающих абразионные берега, и их карбонатном цементе, а гидрокарбонатный состав воды благоприятствует переходу цинка в осадки.

Медь широко представлена во всех типах донных осадков и во всех морфодинамических зонах Ангарских водохранилищ. В донных отложениях водохранилищ элемент связан с пелитовой фракцией, при увеличении дисперсности осадка возрастает количество меди, поэтому элемент в большей мере тяготеет к отложениям глубоководной зоны водоемов. Скачок роста содержания меди происходит при переходе от мелкоалевритовых илов к алевритово-глинистым, что связано с высокой миграционной способностью элемента. Среднее содержание элемента в осадках одного порядка с осадками водохранилищ Днепровского каскада (21 и 28 мг/кг, соответственно), что заметно ниже, чем в осадках природных пресноводных водоемов.

Различия в питающих источниках и гидродинамических условиях создают пятнистость в распределении свинца в донных отложениях Ангарских водохранилищ. Основной формой миграции элемента является взвесь, в составе алевритово-пелитовой фракций которой и перемещается свинец. Четкой взаимосвязи между концентрациями металла во взвеси и донными отложениями не наблюдается. После осаждения свинец довольно прочно, по сравнению с другими элементами, закрепляется в донных отложениях и при нарушении структурных связей в результате механического воздействия на осадок переходит во взвесь, а затем довольно быстро выпадает в осадок снова. Значительное количество элемента дает размыв берегов водохранилищ. Наибольшее содержание свинца отмечается в донных отложениях Братского водохранилища, наименьшее – в осадках Иркутского водохранилища, что почти соответствует количеству металла в осадках озера Байкал. Среднее значение во всех типах донных отложений водохранилищ – 21 мг/кг (Карнаухова и др., 1988). Зависимости содержания свинца от гранулометрического состава осадка проследить не удалось.

Никель и кобальт имеют широкое распространение в осадках и почти одинаковые средние значения содержания элемента присутствуют в донных отложениях Иркутского и Усть-Илимского водохранилищ. Максимально насыщены никелем донные отложения Братского водохранилища. В районах с наименьшей по водохранилищу скоростью осадконакопления, таких как Заярское и Долонское расширения, в осадках отмечается наибольшее количество Ni, Co, составляя величины, превышающие фон в 5 раз. Песчаные отложения более насыщены этими элементами по сравнению с крупными алевритами, поскольку пески содержат в данном районе минералы, богатые этими элементами. Самая низкая концентрация Co в водохранилищах приходится на участки с высокой скоростью осадконакопления, а также на осадки с наибольшим содержанием органического вещества.

Средняя концентрация ванадия в донных отложениях составляет 75 мг/кг, что меньше, чем в осадках некоторых озер, но соответствует содержанию в осадках океанов. В осадках Иркутского водохранилища ванадий (5–60 мг/кг) имеет равномерно пониженное содержание относительно его количества в осадках Братского и Усть-Илимского водохранилищ. Невысокие количества элемента сохраняются в осадках всей Ангарской ветви Братского водохранилища (60–90 мг/кг). Некоторый рост содержания ванадия начинается с Приплотинного участка Братского водохранилища и остается таковым в крупно- и мелкоалевритовых осадках большей части Ангарской ветви Усть-Илимского водохранилища, достигая местами 120 мг/кг. Повышение содержания ванадия связано, возможно, с присутствием в питающей провинции траппового материала.

Количество хрома в донных отложениях водохранилищ находится в пределах концентраций, характерных для осадков поверхностных водоемов. Основным источником хрома являются размываемые породы береговой зоны водохранилищ, а ведущим механизмом поступления его в донные отложения служит механическое фракционирование. Наибольшее содержание элемента отмечается в донных осадках Братского водохранилища (130 мг/кг), наименьшее – Иркутского (65 мг/кг).

## **Заключение**

Процессы осадконакопления элементов терригенного ряда являются ведущими в Ангарских водохранилищах, формируя донные отложения, представленные, главным образом, классом обломочных осадков, образование которых связано с продуктами разрушения горных пород, слагающих берега водохранилищ. Основными типами донных отложений Ангарских водохранилищ являются пески, крупные алевриты, мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы.

Характерным для Ангарских водохранилищ является силикатный тип осадконакопления. Наибольшая аккумуляция  $\text{SiO}_2$  и снижение количества  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  происходят в прибрежной части водохранилищ, где активная гидродинамика и выше в осадке содержание фракции 0.1–0.01 мм. С удалением от питающего источника, представленного абразионным берегом, происходит уменьшение количества  $\text{SiO}_2$  в донных отложениях, которое сопровождается ростом концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Наиболее обогащены  $\text{Al}_2\text{O}_3$  донные осадки головного среди водохранилищ Иркутского водохранилища, что обусловлено активным поступлением в составе абразионного материала, а также каолинита с водой из озера Байкал.

Менее насыщены алюминием донные отложения Братского и Усть-Илимского водохранилищ на участках размыва берегов, сложенных суглинками с большим количеством глинистых минералов. Присутствие окислов щелочноземельных СаО и MgO в донных осадках Иркутского и Братского водохранилищ находится примерно на одном уровне и характеризуется резким снижением в Усть-Илимском водохранилище, в котором среди осадков преобладает крупно-алевритового материала. В глубоководной зоне водохранилищ активно формируются мелкоалевритовые и алевритово-глинистые илы с высоким содержанием пелитовых частиц. Илы активно накапливают  $\text{FeCO}_3$ , способствуя его преобладанию среди карбонатов. Самыми обедненными по концентрации карбонатного материала являются донные осадки Иркутского водохранилища. По сравнению с другими водохранилищами и природными водоемами донные отложения Ангарских водохранилищ довольно бедны микроэлементами.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00194, 14-05-00079, 18-05-00101), Правительства Иркутской области (проект № 075-15-2021-682).

## **Литература**

1. Гроссгейм В.А., Бескровная О.В., Геращенко И.Л., Окнова Н.С., Рожков Г.Ф. Методы палеогеографических реконструкций (при поисках нефти и газа). Л. Изд-во: Недра. 1984. 271с.
2. Карнаухова Г.А., Лещиков Ф.Н., Ломоносов И.С., Гапон А.Е. Микроэлементы в донных отложениях Братского водохранилища // География и природные ресурсы. 1988. № 2. С. 178–183.
3. Иванова А.М., Егорова И.С. Методические рекомендации по геохимическим исследованиям на шельфах полярных морей СССР. Л. Изд-во: НИИГА. 1974. 52 с.
4. Ревенко А.Г. Особенности методик анализа геологических образцов с использованием рентгенофлуоресцентных спектрометров с полным внешним отражением (TXRF) // Аналитика и контроль. 2010. Т. 14. № 2. С. 42–64.
5. Пантеева С.В., Черкашина Т.Ю., Ревенко А.Г., Финкельштейн А.Л. Оценка возможности применения рентгеновского спектрометра с полным внешним отражением S2 PICOFOX для анализа горных пород // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 3. С. 344–352.