

А. Ю. Опекунов

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГЕОХИМИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ

Введение. Возрастающее антропогенное воздействие на водные объекты оказывает влияние на процессы формирования современных донных осадков. При химическом загрязнении, наравне с природными закономерностями дифференциации вещества, проявляется техногенный фактор, изменяющий геохимическую структуру осадков. Дальнейшее усиление антропогенного пресса является причиной трансформации седиментогенеза в техноседиментогенез. Изучение этих процессов имеет важное значение для научно обоснованного прогноза развития ситуации и предотвращения неблагоприятных тенденций на континентальном шельфе в период его вовлечения в развитие нефтегазового комплекса страны.

Теория вопроса, результаты и их обсуждение. При рассмотрении природных закономерностей химической дифференциации вещества А. П. Лисицын [1] выделяет следующие основные подходы по ведущему механизму миграции элементов: седиментогенный, физико-химический и биогеохимический. Чаще в природе наблюдается сложное сочетание указанных механизмов, отражающихся на составе и размещении геохимических типов осадков планетарных геоструктур. В то же время разнообразие обстановок, контролируемых источниками питания, литодинамическими условиями, сочетанием типов дифференциации вещества, способствует формированию, даже в пределах одной морфоструктуры, осадков весьма контрастного химического состава.

На шельфах и в водных объектах России преобладает терригенное осадконакопление. Аутигенные, биогенные и вулканогенные донные отложения распространены ограниченно. Ведущим процессом в терригенном осадконакоплении является механическая дифференциация осадочного материала; физико-химические и биохимические процессы выражены слабее. Химическая дифференциация имеет место на локальных участках шельфа в гумидных и аридных климатических зонах или во внутриконтинентальных водоемах в условиях аридного климата.

Дифференциация и интеграция осадочного материала в водных объектах регламентируются группой физико-географических и геологических факторов осадконакопления. К ним относятся: рельеф прилегающей суши и дна бассейна, тектоническая позиция водосборных площадей и состав питающих провинций, климатические условия и гидрометеорологический режим водного бассейна, физико-химические и биологические характеристики водной среды. Эти факторы были выделены для условий образования морских россыпей и объединены в три основные группы [2]: вещественные, пространственно-морфологические и динамические. Была показана их роль при формировании структурно-вещественного состава донных отложений [3].

Вещественные факторы влияют на донные осадки через состав коренных пород и промежуточных коллекторов, определяют объем компонентов твердой и растворенной фаз, поступающих в бассейн, и региональные кларки химических элементов. Пространственно-морфологическая группа факторов объединяет структурно-тектонические, морфоструктурные и геоморфологические условия, характеризуют пространственное развитие коренных источников сноса и структурно-тектонические неоднородности, контролируя восходящие

потоки вещества. Динамические факторы «отвечают» за процессы транспортировки осадочного материала и его осаждение на дно в конечных бассейнах стока за счет гравитационных, физико-химических и биогеохимических механизмов.

Дифференциация минералогического состава (легкие, тяжелые и глинистые минералы) осуществляется одновременно с гранулометрическим фракционированием осадков. Каждая из минеральных групп приурочена к определенным размерным фракциям в соответствии с гидравлической крупностью и устойчивостью к механическому воздействию. Легкие минералы составляют основную массу кластогенной части осадка песчаной и алевритовой размерностей. Особенности состава терригенно-минералогических ассоциаций в донных отложениях обусловлены составом пород питающих провинций, тектоно-геоморфологическими и климатическими условиями, динамикой среды осадконакопления, т.е. распределение минералов хорошо описывается тремя категориями факторов дифференциации, рассмотренными выше. Выполненная оценка роли каждого фактора [3] показала изменчивость соотношения факторов дифференциации на разных стадиях седиментогенеза от областей мобилизации материала к конечным бассейнам стока, что отражается в общей структуре и составе ведущих парагенетических ассоциаций минералов.

На этапах мобилизации, сноса и перемещения вещества парагенетические ассоциации минералов несут черты состава питающих пород. Последний этап характеризует поведение минералов в конечных бассейнах стока. В осадках пляжа и мелководной зоны в условиях волновой переработки материала отмечается появление парагенезисов, связанных с воздействием динамических агентов среды. Структуру этих ассоциаций формирует группа гидромеханически устойчивых минералов с удельным весом более 4 г/см^3 : ильменит, магнетит, гранат, циркон и т.д. Их концентрация вызвана выносом более легких минералов за пределы береговой зоны и истиранием неустойчивых разновидностей. Выраженность латеральной миграции тяжелых минералов определяется региональными барьерами: плотинного типа – в прибрежной зоне и верхней части берегового склона, где концентрируются наиболее тяжелые гидромеханически устойчивые минералы (плотность $d > 3,5 \text{ г/см}^3$), и перепадного типа – в нижней части берегового склона с накоплением породообразующих минералов ($d < 3,5 \text{ г/см}^3$). Большую роль в дифференциации тяжелой фракции играет комплексный литолого-геохимический барьер «река–море», на котором под влиянием гравитационного фактора могут возникать значительные концентрации рудных минералов.

Таким образом, в условиях волновой и потоковой переработок осадочного материала происходит существенная трансформация минерального состава осадков, вызванная выносом наиболее легких минералов за пределы береговой зоны и относительным накоплением тяжелых в отложениях пляжа и верхней части подводного склона. В формировании ассоциативности металлов в крупно- и среднезернистых песках доминирует вещественный фактор, а в мелкопесчаных и крупноалевритовых осадках при интенсивной переработке материала на первое место выходят гидродинамические механизмы дифференциации [3].

В тонкодисперсных отложениях формирование химического состава происходит главным образом под воздействием гравитационных, физико-химических и биогеохимических процессов. Осаждение микроэлементов осуществляется глинистыми минералами, увеличение сорбционного потенциала которых отмечается в ряду гидрослюда – каолинит, смешанно-слоистые, хлорит – монтмориллонит – вермикулит. Активным сорбентом выступает гидроксид железа. Сорбаты представлены наиболее подвижными в зоне гипергенеза микроэлементами (Cu, Ni, Sr, Mn, Pb, Zn, V и др.). Важную роль в соосаждении металлов играет органическое вещество, выступающее в качестве сорбента или участвующее в образовании металлоорганических комплексов.

В целом каждый из вещественных компонентов (глинистые, тяжелые и легкие минералы, органическое вещество) и размерных фракций характеризуется определенным уровнем накопления химических элементов (табл. 1).

Таблица 1. Средние содержания (мг/кг сух. в-ва) микроэлементов в размерных фракциях и вещественных компонентах донных осадков Анадырского залива

Фракции и компоненты	Количество проб	Sr	Co	Ni	Sc	Y	Cu	Zr	Ti	V	Ba	Mn	Cr
Гуминовые кислоты	7	190	35	260	29	18	3130	230	4490	190	680	160	210
Глинистая (менее 0,01 мм)	21	200	12	39	13	19	45	96	3370	130	550	240	89
Мелкоалевритовая (0,01–0,05 мм)	21	250	9	34	11	22	120	430	4370	79	570	250	97
Крупноалевритовая (0,05–0,1 мм)	3	250	6	16	8	13	48	320	3970	61	700	190	114
Легкие минералы	21	200	<5	6	<5	9	68	80	2100	28	900	<100	14
Тяжелые минералы	12	340	36	350	100	180	240	>10 000	70 000	450	770	4400	1300

Формирующиеся геохимические поля осадков устойчивы во времени, т.е. толерантны к сезонным и более кратковременным изменениям литодинамических условий и источников материалов. Н. Г. Патык-Кара и А. М. Иванова [4] рассматривают геохимические поля осадков, учитывая поликомпонентный состав и многообразие процессов, принимающих участие в их образовании, как сложную многоуровневую систему. При формировании интегрального геохимического поля донных осадков прибрежного шельфа они выделяют три основных уровня неоднородности, которые хорошо укладываются в общую схему латеральной миграции вещества. Каждый из уровней имеет конкретное генетическое значение.

Первый уровень неоднородности связан с существованием высокоэнергетических обстановок, в которых осуществляется преимущественное накопление материала крупнозернистых фракций, и низкоэнергетических, характеризующихся концентрацией тонкодисперсного материала. Сюда входят: область псаммитов, зона смены псаммитов пелитами и область пелитов. В них образуются определенные ассоциации элементов с преобладанием тех или иных форм миграции. Области выноса и накопления химических ингредиентов являются элементами латеральной геохимической зональности первого порядка. На локальных площадях, не выходящих за пределы одной седиментационной зоны, комплексные геохимические аномалии первого уровня могут возникать на структурно-седиментационных барьерах, где происходит перераспределение элементов, часто не отражающееся в гранулометрическом составе осадков и рельефе дна.

Второй уровень неоднородности определяется факторами, осложняющими зональность первого уровня. В естественных условиях в качестве таких факторов могут выступать динамический и/или вещественный. Первый обусловлен дифференциацией материала в волновом поле, сопровождающейся накоплением подвижных металлов в тонкодисперсных осадках и сепарацией кластогенных форм элементов в грубообломочном материале. Во втором случае геохимическая неоднородность вызвана разнородной структурой типоморфных ассоциаций пород питающих провинций. Таким образом, данный уровень определяет вещественно-фациальные особенности геологической среды. В отдельных случаях на второй уровень могут выходить аazonальные факторы формирования геохимического поля: техногенный или рудогенный [4].

Третий уровень неоднородности интегрального геохимического поля отражает влияние различных аazonальных факторов, нарушающих общую картину литогеохимической зональности – рудогенеза, локально проявленных тектонических движений, поступления углеводородов в составе газовых эманаций, техногенеза и т.д. В роли ведущих факторов дифференциации выступают вещественный и/или пространственно-морфологический. Геохимическая информация по третьему уровню неоднородности рассматривается в пределах шельфа как поисково-оценочный признак [4]. На этом же уровне исследуются малоизученные геохимические явления [5].

В рамках изучения геохимических полей при анализе парагенетической ассоциативности химических элементов широко используются математические методы, в частности метод главных компонент (МГК) факторного анализа. Достоинством этой модификации является возможность анализа структуры связей элементного состава и выявления ведущих парагенезисов элементов. Исследования донных осадков акваторий России, проведенные на основе МГК, показали, что первый и второй уровни неоднородности интегрального геохи-

мического поля отражаются, как правило, в двух главных компонентах, характеризующихся максимальными факторными весами. Последний уровень выявляется по третьему или следующим за ним факторам в зависимости от выраженности седиментационных процессов.

Правомерно предположить, что техногенез как причина химического загрязнения акваторий может определять структуру неоднородности геохимических полей на третьем и втором уровнях в зависимости от интенсивности воздействия. При сильном и повсеместном загрязнении водоема, трансформирующем весь вещественно-энергетический поток, антропогенный фактор выступает в качестве основного фактора дифференциации, т.е. обуславливает неоднородность геохимического поля уже на первом уровне. Отсюда следует, что выраженность техногенеза на разных уровнях неоднородности интегрального геохимического поля может служить одним из показателей степени нарушения геологической среды и использоваться в качестве критерия ее состояния.

Литолого-геохимические и геоэкологические исследования на водных объектах, испытывающих антропогенное воздействие, доказали справедливость высказанного предположения. Наряду с тремя природными факторами дифференциации в формировании донных отложений существенную роль может играть техногенный фактор, крайняя степень выраженности которого проявляется в развитии процессов техноседиментогенеза с образованием техногенных илов. При техноседиментогенезе отмечаются [6]:

1) отсутствие первых двух стадий, характерных для седиментогенеза: мобилизации вещества и транспортировки в конечные водоемы стока; сохранение, хотя и в трансформированном виде, стадии интеграции и дифференциации материала, где ведущую роль играет техногенный фактор дифференциации, выраженный главным образом через физико-химические, химические и электрохимические процессы; обусловленность техноседиментогенеза действием комплексных техногенных геохимических барьеров, среди которых доминируют барьеры окислительно-восстановительного класса;

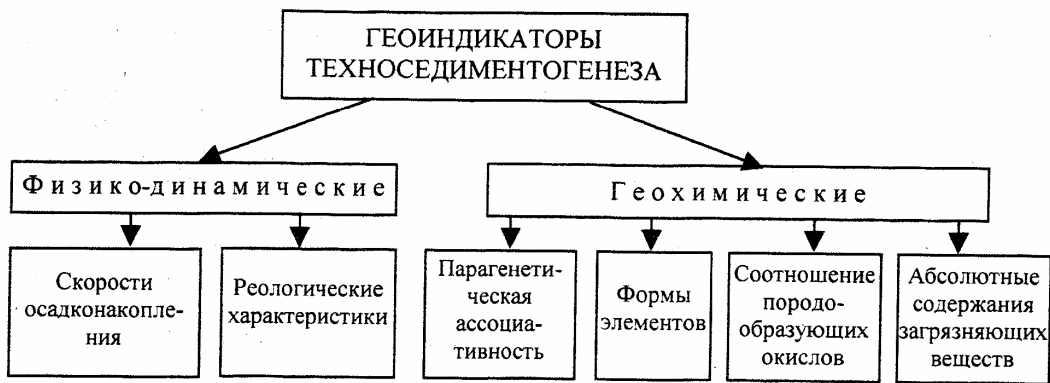
2) тонкодисперсный состав отложений, иногда с бимодальной гранулометрической структурой, специфические физико-механические свойства, сохраняющиеся по всему разрезу в среднем от 0,5 до 3,0 м – текучие (показатель текучести более 3) глинистые и суглинистые илы (число пластичности более 10) со значительным коэффициентом пористости (более 3); аномально высокие скорости накопления осадочного материала; формирование дисперсной среды с выраженными реологическими свойствами;

3) максимальная концентрация в осадочном материале легкоокисляемого органического вещества аллохтонного происхождения, формирование восстановительных условий с поверхности донных отложений, не связанных с диагенетической стадией преобразования осадка;

4) высокие уровни накопления микроэлементов, ассоциативность которых в первую очередь отражает характер техногенных потоков вещества и специфику окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий; загрязненность техногенных илов тяжелыми металлами, поллютантами органического происхождения, включая ксенобиотики, определяющими токсичность техногенных илов.

Техноседиментогенез отличается от естественных процессов осадкообразования. Он мало регламентируется климатическими, геологическими и тектоническими условиями. Основные геоиндикаторы степени нарушения донных отложений, одновременно являющиеся признаками техноседиментогенеза, отражают трансформацию режима осадконакопления и изменения физико-динамических и химических характеристик осадков (рисунок). Эволюция техногенного воздействия отчетливо проявляется через вещественный состав донных осадков по четырем геохимическим показателям.

Первый отражает парагенетическую ассоциативность элементов через ведущие факторы дифференциации. В целом химические парагенезисы могут формироваться на конечном этапе транзита осадочного материала под влиянием динамических факторов либо наследовать состав пород питающих провинций, промежуточных



Геоиндикаторы техноседиментогенеза в аквальных геосистемах.

коллекторов, вещественный состав эманаций. В условиях химического загрязнения в ассоциативности элементов самостоятельную роль играет техногенный фактор, отражая специфику антропогенного воздействия. Критериями выявления техногенных парагенезисов являются: химическая специализация источников загрязнения, наличие «запрещенных» ассоциаций элементов, пространственная неоднородность геохимического поля и ее взаимосвязь с основными источниками загрязнения и др.

Второй геохимический признак – изменение соотношения форм химических элементов под воздействием техногенеза в донных осадках. Явление антропогенной инверсии форм металлов приводит к увеличению доли легкоподвижных форм, что отличает техногенную геохимическую аномалию от природной. Возрастает доля поверхностно-сорбированных обменных форм. Появляется большое количество органоминеральных соединений, что связано с многообразием форм органического вещества в зоне техногенеза. Специфическим является преобладание сорбционно-карбонатной формы металлов. В ней может быть представлено до 50% Ni и Pb и до 80–90% Cd. Распространена гидроокисная (Ni и Pb до 30%) и органоминеральная (Cu до 40%) формы [7]. В сероводородной среде соотношение форм металлов меняется. Так, в р. Преголе солевая форма (предположительно сульфидная) преобладает для Zn, Cd, Pb, Cu, т.е. для металлов, сульфиды которых отличаются наименьшими значениями произведения растворимости. Сорбционно-карбонатная форма в техногенных осадках этой реки составляла доли процентов, однако для некоторых металлов оставалась значимой органоминеральная форма: Cu – 5–30%; Zn – 2–25%; Ni – 0,5–23%; Cd – 0,5–4%; Pb – до 3,5%.

Третий показателем служит петрохимическая характеристика отложений [8]. Для техногенного материала сточных вод типичны низкие содержания кремнезема и высокие концентрации органического вещества, оксида алюминия, закиси и окиси железа, повышенная карбонатность. Это объясняется преимущественно илистым составом техногенных отложений, а также содержаниями частиц антропогенного происхождения с пониженным кремнеземом: рудные обломки, углистые, графитовые, сажистые частицы, шлаки и пр. Формирующиеся техногенные илы характеризуются пониженным показателем зрелости ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 5-8$), высокими значениями закисного ($\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 > 1$) и органо-кремнивого ($\text{ППП}/\text{SiO}_2 > 0,1$) показателей, а также низкими величинами индекса дифференциации материала ($\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} < 30$).

Четвертый геохимический показатель развития техногенеза отражает абсолютные содержания химических ингредиентов в донных отложениях. Концентрации поллютантов, представляющих группу тяжелых металлов, биофильных или радиоактивных элементов, органических веществ, по отношению к фоновым содержаниям возрастают по мере усиления антропогенного воздействия, достигая значений, соответствующих рудным концентрациям металлов, значительно превосходящим допустимые экологические нормативы. В осадках происходит накопление ксенобиотиков. В практике геоэкологических исследований используется ряд показателей, расчет которых основан, как правило, на сравнении абсолютных содержаний поллютантов с фоновыми характеристиками. К ним относятся коэффициент концентрации химического элемента, суммарный показатель загрязнения, коэффициент среднего накопления элементов, формула концентрации ингредиентов и др., подробно рассмотренные в работе Е. П. Янина [8].

Перечисленные геохимические показатели (парагенетическая ассоциативность, петрохимические показатели, абсолютные содержания) выступают индикаторами усиления роли техногенного фактора в формировании осадков водоема. Они могут проявляться как одновременно, так и последовательно – от изменения ассоциативности к резкому увеличению содержаний в осадке. Их необходимо учитывать при мониторинге геологической среды,

контролируя не только количества загрязняющих веществ, но и изменение структуры геохимических связей в донных осадках.

Указанные выше закономерности можно продемонстрировать на примере водных объектов Северо-Запада России, в разной степени испытывающих антропогенное воздействие, а также районов восточно-арктического шельфа, рассматриваемых в качестве ненарушенных акваторий. В первую группу входят реки Малая Сестра (Ленинградская обл.), Веряжа (Новгородская обл.), Преголя (Калининградская обл.), Екатеринбург (С.-Петербург) и оз. Сестрорецкий Разлив (Ленинградская обл.). В качестве ненарушенной акватории принят Анадырский залив (Берингово море).

Исследование факторов дифференциации осадочного материала в Анадырском заливе проводилось на основе комплексного изучения гранулометрического, минералогического и химического составов образцов донных осадков [3]. Формула концентрации химических элементов ($Sc_{1,6}-Cr_{1,2}$) указывает на то, что содержания большинства ингредиентов в донных осадках ниже или близки кларку осадочных пород (табл. 2). На первом уровне неоднородности геохимического поля донных осадков доминирующим является динамический фактор, отражающий закономерности осадконакопления в высоко- и низкоэнергетических районах (табл. 3). Второй фактор определяет фациальные условия формирования донных

Таблица 2. Содержания химических элементов (мг/кг сух. в-ва) в донных осадках водных объектов

Химические элементы	Анадырский залив (n = 181)	р. Малая Сестра (n = 50)	оз. Сестрорецкий Разлив (n = 26)	р. Веряжа (n = 84)	р. Преголя (n = 77)	р. Екатеринбург (n = 65)
Ba	557/231	717/174	Не опр.	1431/2455	489/393	Не опр.
Cu	31,2/32,8	22,8/53,8	31,0/15,0	29,1/18,0	215/369	182/173
Cr	120/132	65,6/70,3	46,0/11,2	104/70,0	194/150	127/108
Co	14,1/22,9	3,2/2,8	17,0/6,0	13,2/6,7	12,3/4,8	Не опр.
Mn	331/121	69,0/59,3	Не опр.	334/232	615/547	„ „
Ni	49,2/24,0	43,7/38,3	36,0/14,6	44,9/18,6	74,0/44,0	24,7/19,9
Sr	292/231	130/116	Не опр.	100/95,0	123/137	Не опр.
Ti	2953/1029	1045/343	„ „	4000/1534	3513/1162	„ „
V	73,0/31,0	17,6/11,8	„ „	62,3/26,5	70,0/29,4	„ „
Zn	Не опр.	34,0/36,7	183/83,5	149/85,0	282/272	1499/3049
Zr	162/156	182/127	Не опр.	247/127	218/97	Не опр.
Sc	15,8/27,5	3,2/1,5	„ „	8,7/5,5	4,3/4,7	„ „
As	Не опр.	40,0/16,1	11,0/5,9	28,9/32,0	51,8/44,0	8,2/2,2
Cd	„ „	4,6/5,4	2,2/1,1	Не опр.	1,2/0,47	27,4/39,1
Y	23,4/25,5	10,8/8,1	Не опр.	24,0/14,8	22,7/16,4	Не опр.
Ga	9,2/14,8	4,6/2,0	„ „	7,5/5,6	10,6/6,4	„ „
Pb	Не опр.	34,9/15,5	37,0/15,2	84,8/161	82,5/64,0	479/675
Hg	„ „	Не опр.	0,06/0,02	0,04/0,03	0,18/0,10	1,6/3,7

Примечание. Перед чертой указано среднее значение, за чертой – стандартное отклонение; n – количество проб.

осадков. Он выявляет две антагонистические ассоциации: металлы, накапливающиеся в обломочной части осадка, и элементы тонкодисперсной фракции. В структуре главных факторов хорошо выражены типоморфные ассоциации металлов [9]: перидотит-гарибургитовой формации (Ni-Cr), щелочных гранитов-сиенитов (Sr-Co) и продуктов размыва вулканогенных пород Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Ba-Y-Zr). Третий фактор показывает геохимические различия продуктов размыва глин плиоценового возраста и современных тонкодисперсных осадков в областях аккумуляции. Обобщенная формула факторов дифференциации (ОФФД) осадочного материала в Анадырском заливе имеет типичный для фоновых акваторий вид

$$I_{21}D^1II_{14}D^2VIII_{11}Pm,$$

где I, II, III – номера факторов; нижний индекс – вес факторов; D^1 – динамический фактор первого уровня неоднородности геохимического поля; D^2 – динамический (фациальный) фактор второго уровня неоднородности; V – вещественный фактор; Pm – пространственно-морфологический фактор.

Река Малая Сестра расположена в пределах Сестрорецкой курортной зоны. В истоке реки, образующейся в результате сброса воды из оз. Сестрорецкий Разлив через систему гидротехнических сооружений, находится инструментальный завод им. Воскова. Он является одним из основных источников загрязнения водотока, впадающего в Финский залив. Осадки реки представлены мелко- и среднезернистыми песками и лишь на отдельных застойных участках дна происходит накопление черных полужидких илов мощностью до 0,5 м. Именно в последних отмечается аккумуляция поллютантов, из которых наибольшее значение имеют Cd и As. В целом формула концентрации химических элементов ($Cd_{15,3}-As_{6,1}-Pb_{1,7}$) свидетельствует о невысокой степени загрязнения осадков (см. табл. 2). В структуре главных факторов первые две компоненты (см. табл. 3) отражают природные закономерности дифференциации осадочного материала – в зависимости от энергетики среды и подвижности химических элементов. Третий фактор оценивает техногенный поток вещества, выраженный ассоциацией Cr-Cd-Co. Характерно, что содержания Ni и Cr в целом невелики, однако на участках загрязнения они формируют концентрации, превосходящие средние значения в несколько раз. Локализация загрязнения осадков, вызванного деятельностью предприятия, обусловлена особенностями строения русла реки и динамикой водного потока. Это позволяет говорить, что техногенный фактор дифференциации осадочного материала определяет третий уровень неоднородности геохимического поля, а ОФФД в р. Малая Сестра имеет структуру $I_{19}D^1III_{16}D^2III_{12}T$ (где T – техногенный фактор дифференциации).

Озеро Сестрорецкий Разлив, образованное как водохранилище 280 лет назад, на протяжении всей истории существования не подвергалось прямому химическому загрязнению в виде сбросов промышленных и коммунально-бытовых вод. Однако проходящая вблизи водоема автомобильная трасса, поступление загрязняющих веществ с водами рек, впадающих в озеро (реки Сестра и Черная), а также ливневые стоки привели к трансформации природных механизмов дифференциации и к изменениям в геохимической структуре донных отложений водоема. При относительно невысоких содержаниях химических элементов (см. табл. 2) и концентраций поллютантов ($Cd_{7,4}-Zn_{2,3}-Pb_{1,9}-As_{1,7}$) в озере установлены зоны загрязнения донных осадков в устье р. Черной и вблизи автострады, которые формируют второй уровень неоднородности геохимического поля осадков. Первый и третий факторы «отвечают» за природные закономерности дифференциации материала: через энергетику среды и пространственно-морфологические особенности ($I_{34}D^1II_{23}III_{15}Pm$), которые вызваны размывом на отдельных участках дна нижнеголоценовых озерных глин, а также различиями в химическом составе глин и современных илов.

Река Веряжа берет начало, из оз. Вязицкое и впадает в оз. Ильмень. В среднем течении она расположена в пределах г. Новгорода и принимает стоки ряда промышленных, транспортных и коммунально-бытовых предприятий. В результате загрязнения на городском участке реки донные отложения представлены мощной толщей (1,0–1,5 м и более) черных техногенных илов. В верхнем течении на дне водотока преобладают мелкозернистые илистые пески незначительной мощности, в нижнем течении осадки сложены глинистыми алевритами серого и темно-серого цвета небольшой мощности (0,2–0,4 м). Формула концентрации химических элементов в осадках всего водотока ($As_{4,4}-Pb_{4,2}-Zn_{2,3}-Ba_{1,8}-Zr_{1,2}$) показывает преимущественное накопление мышьяка, свинца и цинка (см. табл. 2). Однако в среднем течении при очень высоких концентрациях поллютантов наиболее выражено загрязнение осадков Pb (до 880 мг/кг) и Ba (до 2%). В структуре главных компонент химического состава отложений первый фактор отражает энергетические свойства среды осадконакопления (см. табл. 3), которые определяют первый уровень неоднородности химического состава донных отложений. Второй и третий факторы интерпретируются как техногенные, формируя второй и третий уровни неоднородности. При этом парагенезис Pb-Ba-As является индикатором загрязнения городского участка реки предприятиями электронной промышленности, а Ti-Zn – транспортными организациями. Таким образом, структура ОФФД ($I_{31}D^1II_{16}III_{18}T$) подчеркивает неблагоприятные тенденции развития геоэкологической ситуации на водотоке.

На р. Преголе изучалась приустьевая область водотока (протяженностью 16 км и расположенная в основном в черте г. Калининграда), для которой свойственно значительное воздействие на экосистему промышленных и ком-

Таблица 3. Парагенезисы химических элементов в донных осадках Анадырского залива и внутренних водных объектов Северо-Запада России в обобщенных факторных нагрузках

Объекты	F_1	F_2	F_3
Анадырский залив	$\frac{\text{Ti}_{0,83}\text{V}_{0,76}\text{Co}_{0,63}\text{Sc}_{0,55}\text{Cu}_{0,53}\text{Mn}_{0,52}}{\text{Ba}_{0,32}}$ (21,3%)	$\frac{\text{Ni}_{0,62}\text{Co}_{0,43}\text{Sc}_{0,42}\text{Mn}_{0,39}}{\text{Cu}_{0,56}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,36}}$ (13,8%)	$\frac{\text{Sr}_{0,55}\text{Cr}_{0,52}\text{Mn}_{0,44}\text{Ga}_{0,31}\text{Ni}_{0,28}}{\text{Sc}_{0,42}\text{Co}_{0,30}}$ (11,2%)
р. Малая Сестра	$\frac{\text{Zn}_{0,68}\text{Y}_{0,62}\text{Mn}_{0,55}\text{Cu}_{0,53}\text{Cd}_{0,47}\text{Co}_{0,43}\text{Sr}_{0,40}}{\text{Ba}_{0,49}}$ (18,6%)	$\frac{\text{Y}_{0,46}\text{Ti}_{0,41}\text{Mn}_{0,41}\text{Zn}_{0,41}}{\text{Sr}_{0,69}\text{Ba}_{0,58}\text{Co}_{0,5}\text{As}_{0,45}}$ (16,3%)	$\frac{\text{Sc}_{0,47}\text{Y}_{0,39}\text{Sr}_{0,38}}{\text{Cr}_{0,64}\text{Cd}_{0,62}\text{Co}_{0,40}}$ (11,5%)
оз. Сестро-рецкий Разлив	$\frac{\text{Hg}_{0,84}\text{Pb}_{0,83}\text{Zn}_{0,74}\text{Cd}_{0,66}\text{As}_{0,58}\text{Cu}_{0,39}\text{Cr}_{0,39}}{-}$ (34,1%)	$\frac{\text{Ni}_{0,85}\text{Co}_{0,84}\text{Cu}_{0,64}}{\text{Zn}_{0,32}\text{Pb}_{0,24}}$ (23,0%)	$\frac{\text{Zn}_{0,38}\text{Co}_{0,37}\text{Cd}_{0,33}\text{Ni}_{0,25}}{\text{Cr}_{0,82}\text{Cu}_{0,42}}$ (14,6%)
р. Веража	$\frac{\text{V}_{0,86}\text{Ga}_{0,84}\text{Sc}_{0,83}\text{Co}_{0,82}\text{Mn}_{0,74}\text{Y}_{0,55}\text{Cu}_{0,52}\text{Ni}_{0,43}}{-}$ (30,5%)	$\frac{\text{Pb}_{0,88}\text{Ba}_{0,81}\text{Sb}_{0,76}\text{Cu}_{0,70}\text{Y}_{0,40}\text{Zn}_{0,40}}{-}$ (16,1%)	$\frac{\text{Ti}_{0,79}\text{Zn}_{0,77}\text{Ag}_{0,73}\text{Ba}_{0,33}\text{Y}_{0,31}}{\text{As}_{0,37}}$ (7,9%)
р. Преголя	$\frac{\text{V}_{0,82}\text{Co}_{0,70}\text{Cu}_{0,67}\text{Cr}_{0,67}\text{Mn}_{0,65}\text{Zn}_{0,64}\text{Ga}_{0,64}\text{Ti}_{0,62}\text{Ni}_{0,55}\text{As}_{0,33}}{-}$ (29,6%)	$\frac{\text{As}_{0,68}\text{Pb}_{0,64}\text{Ba}_{0,60}\text{Zn}_{0,48}\text{Co}_{0,33}}{\text{Mn}_{0,50}\text{Zr}_{0,47}\text{Ti}_{0,47}\text{Cr}_{0,42}}$ (18,3%)	$\frac{\text{Ga}_{0,47}\text{Ni}_{0,40}}{\text{Cu}_{0,42}\text{Zr}_{0,36}\text{Co}_{0,35}}$ (8,8%)
р. Екатеринбургска	$\frac{\text{Cu}_{0,94}\text{Cd}_{0,86}\text{Cr}_{0,82}\text{Ni}_{0,63}\text{Pb}_{0,62}\text{Zn}_{0,51}\text{Hg}_{0,49}}{-}$ (49,2%)	$\frac{\text{Pb}_{0,57}\text{Ni}_{0,26}\text{Cr}_{0,25}}{\text{Hg}_{0,74}}$ (13,5%)	$\frac{\text{Hf}_{0,64}\text{Ni}_{0,4}}{\text{Zn}_{0,40}\text{Cd}_{0,25}}$ (10,1%)

Примечание. НУВ – нефтяные углеводороды. Жирным выделены парагенезисы техногенного фактора.

мунально-бытовых предприятий. В верхнем течении обследованного участка реки донные осадки представлены преимущественно аллювиальными песчаными отложениями небольшой мощности, в нижнем течении они имеют аллювиально-морское происхождение и сложены песчано-илистыми фракциями. На городском участке в среднем течении изучаемого водотока установлено широкое развитие техногенных илов мощностью до 3,0 м. Общий характер загрязнения ($As_{7,8}-Pb_{4,1}-Cd_{4,0}-Cu_{3,8}-Zn_{3,5}-Cr_{1,2}$) позволяет констатировать полиэлементную структуру техногенного воздействия, что вызвано присутствием крайне разнообразных по химической специализации источников загрязнения (см. табл. 2). В формировании структуры геохимического поля первого порядка основную роль играет энергетика среды осадконакопления. Второй и третий факторы интерпретируются как техногенные ($I_{30}D^1\Pi_{18}ГП_9T$). Особенности структуры полиэлементных ассоциаций определяются спецификой загрязнения разных участков реки, а также окислительно-восстановительными условиями (второй фактор), носящими здесь выраженный сезонный характер.

Река Екатеринбургка частично входит в инфраструктуру Санкт-Петербургского морского порта, на ее берегах разместилось несколько крупных промышленных предприятий. Особенности гидрологического режима явились причиной развития застойных явлений и формирования благоприятных условий накопления техногенных илов, мощность которых достигает 1,5 м и более. Екатеринбургка – один из наиболее загрязненных водотоков города, характеризуется чрезвычайно высокими концентрациями широкого перечня химических элементов ($Cd_{91,3}-Pb_{24,0}-Zn_{18,7}-Hg_{4,0}-Cu_{3,2}-Ni_{3,0}-Cr_{1,2}-As_{1,2}$). Все три главных фактора ($L_{49}ГП_{14}ГП_{10}T$) отражают специфику техногенного воздействия на процессы осадконакопления, формируя аномальное геохимическое поле осадков (см. табл. 3). Такие тенденции в развитии процессов дифференциации вещества позволяют говорить о доминировании техноседиментогенеза, приведшего к необратимым негативным последствиям для экосистемы реки. Замена естественных процессов дифференциации вещества техногенными ведет к уменьшению самоорганизующего начала геосистемы и увеличению энтропии. По мнению основателя термодинамики неравновесных систем И. Пригожина, «дифференцирующая сила – творец организации» [10, с. 99]. В теории седиментогенеза это положение влечет за собой важный вывод: дифференциация материала – обязательный итог развития неравновесной системы осадочного бассейна, а затухание процессов дифференциации – признак термодинамической (экологической) деградации геосистемы и одновременно важный показатель развития процессов техноседиментогенеза в бассейне.

Таким образом, в зависимости от геоэкологических условий водных объектов и преобладающих факторов дифференциации осадочного материала формируется парагенетическая ассоциативность химических элементов, отражающая разные уровни неоднородности геохимических полей. Особенности латеральной геохимической зональности первого порядка в структуре полиэлементных ассоциаций проявляются в накоплении всей группы микроэлементов в тонкодисперсных осадках низкоэнергетических областей и выносе их из гидродинамически активных зон. Как правило, ассоциация элементов первого порядка характеризуется устойчивыми корреляционными связями, вес первой компоненты составляет 18–30%, показатель значения компоненты каждого отдельного объекта в значительной мере зависит от гранулометрического состава осадков. В общей структуре малых элементов индикаторами отложений высокоэнергетических зон могут выступать Ва (полевошпатовая составляющая песчаной фракции), Zr, реже Ti или Cr (тяжелые минералы песчаной и крупноалевритовой фракции), иногда Sr (обломки ракуши в составе песчаных осадков). В некоторых случаях указанная химическая специализация высокоэнергетических зон может не проявляться. В целом данный фактор отражает закономерности механической дифференциации осадочного материала и интерпретируется как динамический. В представленных результатах, полученных на основе МГК, он обуславливает закономерности геохимической дифференциации осадков Анадырского залива, рек Малая Сестра, Веряжа, Преголя, оз. Сестрорецкий Разлив.

На втором уровне неоднородности геохимического поля донных осадков определяющим может выступать как динамический (фациальный), так и вещественный факторы дифференциации. Динамический фактор проявляется через ассоциативность химических элементов, характеризующихся разной подвижностью в зоне гипергенеза (по принадлежности к тонкодисперсным или песчаным осадкам). Вещественный фактор дифференциации выражается через типоморфные парагенезисы элементов. В максимальной степени он свойствен районам, обладающим разнообразным составом питающих пород. В целом же в структуре первых двух факторов формируются 2–4 парагенетические ассоциации элементов, являющиеся результатом развития указанных выше процессов распределения осадочного материала.

Третий уровень контрастности обусловлен геохимической специализацией донных осадков на локальных участках за счет нелатерального потока вещества (размыв и эманации). Интерпретация структурно-морфологического фактора, как правило, затруднена и более надежна при включении в анализируемую выборку не только современных осадков, но и подстилающих отложений.

Техногенный фактор дифференциации осадочного материала в зависимости от степени антропогенной нагрузки может проявляться на любом из указанных уровней неоднородности геохимического поля. По мере нарастания нарушенности геологической среды его значимость возрастает по весовым показателям и степени проявленности в геохимическом поле. В ряду анализируемых геосистем техногенный фактор выражен на третьем (р. Малая Сестра) и втором уровнях (реки Веряжа, Преголя, оз. Сестрорецкий Разлив). Он может быть представлен либо одной или двумя техногенными ассоциациями, либо альтернативной комбинацией природного и техногенного парагенезисов. В Екатеринбургской акватории этот фактор определяет закономерности дифференциации и полиэлементную структуру отложений уже на первом уровне неоднородности геохимического поля. Техногенная парагенетическая ассоциативность элементов характеризуется значительным весом фактора (50% и более), вхождением в парагенезис всей рассматриваемой группы элементов и химических веществ, высокими значениями корреляционных связей. Принципиальные отличия от динамического фактора (компоненты которых внешне схожи) заключаются в отсутствии зависимости геохимической структуры от гранулометрического состава и соответственно энергетических параметров среды. Второй и третий факторы отражают дифференциацию химических элементов внутри техногенной ассоциации в зависимости от специфики источников загрязнения на том или ином участке акватории.

Заключение. Результаты геохимических исследований водных объектов с разным уровнем техногенной нарушенности позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Процесс формирования геохимической структуры донных осадков подчиняется определенным закономерностям и обуславливается тремя основными группами факторов дифференциации: динамическими, вещественными и пространственно-морфологическими, каждый из которых «отвечает» за конкретный уровень неоднородности геохимического поля. Эффективным методом выявления факторов дифференциации осадочного материала, их интерпретации и геохимического районирования акватории является МГК факторного анализа.

2. В условиях антропогенного воздействия самостоятельную роль в образовании геохимической структуры донных отложений играет техногенный фактор, степень проявленности которого на том или ином уровне контрастности геохимического поля зависит от интенсивности воздействия.

3. Основными геохимическими показателями развития техногенного фактора дифференциации осадочного материала и одновременно геоиндикаторами состояния донных отложений являются перестройка парагенетической ассоциативности химических элементов в структуре осадков, изменения форм химических элементов и петрохимических показателей, увеличение абсолютных содержаний загрязняющих веществ.

4. При проведении мониторинга геологической среды водных объектов необходимы изучение абсолютных содержаний загрязняющих веществ и анализ парагенетической ассоциативности химических элементов, изменение которой указывает на опасность развития процессов техноседиментогенеза. В некоторых случаях мониторинг структуры связей химических элементов позволяет выявить неблагоприятные тенденции на более ранних этапах, чем при контроле абсолютного содержания загрязняющих веществ. Этот результат имеет принципиальное значение для обоснования осуществления полигонного принципа мониторинга геологической среды на лицензионных участках при разработке нефтегазовых

ресурсов континентального шельфа, для внедрения мероприятий по охране окружающей среды.

Summary

Opekuov A. Yu. The influence of technogenic effect on the geochemical structure of recent bottom sediments.

The paper deals with the problems of formation of geochemical structure of recent bottom sediments under both natural conditions and different anthropogenic effect. The main factors in formation of heterogeneous geochemical field of bottom sediments are defined based on the method of factorial analysis of major components. The North-Western Russia reservoirs under anthropogenic effect are taken as an example of technogenic influence on transformation of geochemical structure of sediments. Appearance of the technogenic factor of differentiation alongside with the natural ones, the role of which varies depending on the level of the effect, is substantiated. Inferred are the main geoindices of the bottom sediment state. The study of paragenetic association of chemical elements in bottom sediments is considered as a possible way to monitor geological conditions in reservoirs and on the continental shelf.

Литература

1. *Биогеохимия океана* / Под ред. А. С. Мониной, А. П. Лисицына. М., 1983.
2. *Айнемер А. И.* Факторы россыпьобразования и последовательность их изучения на побережье и шельфе восточно-арктических морей СССР // *Геология моря* / Отв. ред. Б. Х. Егизаров. Л., 1975. Вып. 4.
3. *Опекунов А. Ю.* Дифференциация осадочного материала на шельфе восточно-арктических морей (на примере Анадырского залива): Автореф. канд. дис. Л., 1990.
4. *Патык-Кара Н. Г., Иванова А. М.* Геохимические поиски месторождений твердых полезных ископаемых на континентальном шельфе. М., 2003.
5. *Opekuov A. Yu., Krasnov S. G., Prokhorova S. M.* et al. Fine-dispersed gold fractionation geology and geochemistry in shelf sedimentation // *Marine mining*. 1989. Vol. 8.
6. *Опекунов А. Ю., Холмянский М. А., Курilenko В. В.* Введение в эогеологию шельфа: Учеб. пособие. СПб., 2000.
7. *Янин Е. П., Разенкова Н. И., Журавлева М. Г.* Техногенные илы – потенциальный источник загрязнения речных систем // *Геоэкологические исследования и охрана недр: Науч.-техн. информ. сб.* М., 1992. Вып. 1.
8. *Янин Е. П.* Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М., 2002.
9. *Формации и седиментогенез материковой окраины (на примере шельфовых зон Северо-Востока СССР* / Под ред. Б. Х. Егизарова. Л., 1981.
10. *Пригожин И.* От существующего к возникающему / Пер. с англ.; Под ред. Ю. Л. Климантовича. М., 1985.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2003 г.