

А.Ю. Опекунов, М.А. Холмянский (ВНИИОкеангеология)

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ШЕЛЬФЕ

Федеральная программа «Геоэкология шельфа России» предусматривает проведение геоэкологических исследований и постановку мониторинга геологической среды шельфа (рисунок). Конечной целью реализации программы является охрана морской среды и обеспечение экологически безопасного и рационального освоения шельфа. Концептуально структура работ предполагает набор обеспечивающих блоков, этапы и направления работ, способствующие достижению определенного уровня знаний для реализации основной цели.

Комплексное решение этих задач наряду с региональными работами требует изучения многих системных положений, связанных с проблемами структурно-функциональной организации геосистемы шельфа и ее геологической среды.

Рассмотрим наиболее актуальные направления геоэкологических исследований шельфа, развитие которых, на наш взгляд, должно сыграть свою роль в понимании общих закономерностей развития и функционирования морских экосистем, а также в становлении геоэкологического картографирования и мониторинга геологической среды. Из познания таких элементов и формируется системность в подходах к проблеме экологической безопасности шельфа.

1. Геоэкологические границы и устойчивость геологической среды

Аксиома о непрерывности и дискретности биосферы распространяется на любую геосистему, включая континентальный шельф. В целом проблема континуально-дискретной организации геосистем - это во многом проблема границ. Характер и структура границ определяют особенности вещественного, энергетического и информационного обмена геосистемы на внутреннем и внешнем, уровнях и соответственно ее способность к саморегуляции и устойчивость к внешним воздействиям.

В развитии и функционировании водных геосистем границы имеют особое значение. Они во многом определяют их структуру; влияние границ может распространяться далеко за рамки одной геосистемы. Так, например, влияние барьера «река-море» охватывает как морские, так и прибрежные геосистемы.

При исследовании вопроса о роли геоэкологических границ в геосистеме шельфа необходимо отметить, что под ними понимаются те же физико-химические, химические, гидродинамические границы, традиционно изучаемые в морской геологии, литологии и геохимии. Рассмотрение их как геоэкологических, отнюдь, не связано с принципиально новыми природными явлениями. Данное название при изучении проблемы барьеров лишь несколько смещает акценты в сторону оценки их влияния на функционирование морских экосистем и прогноза развития ситуации в случае усиления вредного воздействия со стороны человека, в том числе при осуществлении хозяйственной деятельности на морских акваториях.

В соответствии с континуально-дискретной организацией границы могут быть постепенными и резкими. Постепенные границы являются отражением принципа непрерывности (континуальности) морских геосистем и обеспечивают устойчивость фундаментальных параметров их функционирования: температуры, давления, освещенности, солевого состава воды и химического состава литосферы. Градиент

параметров континуума минимален. Резкие границы определяют свойство дискретности геосистем. Они оказывают решающее влияние на массоэнергетический обмен в море.



Границы делятся на два класса: границы-разделы и границы-барьеры (в научной литературе, как правило, все они терминологически объединены под общим названием - барьеры).

Границы-разделы характеризуют раздел между разными фазовыми состояниями веществ (твердое, жидкое, газообразное). В морских экосистемах к основным разделам относятся границы атмосфера-вода, вода-лед, лед-атмосфера, вода-дно (в какой-то степени сюда можно отнести раздел между физическими и биологическими системами). По своим физическим особенностям поверхности разделов в пространственно-временном измерении субстационарны. Другим важным свойством этих границ является разнородность химического состава сред, обусловленная разными агрегатными состояниями вещества, что существенно влияет на процессы массообмена. Градиенты основных параметров, определяющих их физическую суть, составляют большие величины.

Другой тип - *границы-барьеры* возникают внутри физически однородных сред и обусловлены изменениями их физико-химических характеристик и параметров. Масштаб барьеров может быть самым разным: от локального проявления до регионального воздействия. В пространственно-временном измерении они более динамичны, чем границы-разделы. Типичными барьерами для морских экосистем являются границы распространения галоклина и фронтов постоянных течений, барьер река-море. Градиент параметров может изменяться в широком диапазоне величин, но в количественном отношении он все же уступает градиентам на границах-разделах.

Континуальность геосистем обеспечивает устойчивое фоновое распределение химических элементов. В поле развития континуума химическая энтропия максимальна, а ее производство стремится к нулю. Отсюда вытекает важный методический вывод: определение геохимического фона компонентов может иметь смысл только в пределах одного континуума.

На *границах-разделах* осуществляются фазовые переходы химических соединений и веществ, как правило, приводящие к концентрации ингредиента в одной фазе и его удалению из другой. Механизмы могут быть разные, но они определены, в первую очередь, химическими свойствами самих веществ и физико-химическими параметрами среды (рН, Eh, наличие сорбентов). Именно в процессе перемещения между разными средами роль химических свойств веществ возрастает.

Границы-барьеры определяют дискретность в распределении вещества внутри одной среды. При эколого-геологических исследованиях наиболее существенными являются комплексные геохимические барьеры и барьерные зоны. Под их влиянием, как правило, формируются естественные геохимические аномалии, а в условиях техногенного воздействия - зоны наиболее интенсивного загрязнения. Свойства барьеров во многом определяются физико-химическими параметрами и динамическими условиями среды.

Процессы на поверхности разделов контролируют общий вещественно-энергетический баланс в системе. Барьеры являются одним из основных механизмов химической, физической (электропроводность, оптические, магнитные свойства и пр.) и механической (гранулометрический состав, плотность и т.д.) дискретности. Они играют важную роль в снижении энтропии, следовательно, выполняют саморегулирующие функции экосистемы шельфа.

Важнейшим свойством границ и континуумов является их термодинамический потенциал. На границах-разделах отмечается высокая контрастность химических ингредиентов, что соответствует максимальному производству энтропии. В зоне действия барьеров градиенты этих параметров характеризуются более низкими значениями и более низким производством энтропии. В пределах континуума производство энтропии вследствие однородности геохимических и геофизических полей минимально.

Все эти свойства существенным образом определяют *устойчивость* геосистемы шельфа. Если под устойчивостью экосистем понимать их способность противостоять росту энтропии (термодинамический принцип устойчивости), ряд снижения устойчивости экосистем в пределах перечисленных выше зон будет выглядеть следующим образом: континуум → барьерная зона → поверхность раздела сред. Исходя из этого принципа, выделяются первоочередные *объекты и районы мониторинга геологической среды шельфа*. К ним относятся поверхность моря и околосводный слой атмосферы, дно, т.е. поверхностный слой осадков и придонный слой воды. Изменения основных геохимических (основные гидрохимические показатели, содержания тяжелых металлов и токсичных органических веществ, рН и Eh) и биогеохимических (общие показатели состояния биотических сообществ, продуктивность, численность видов и т.д.) параметров в этих средах относительно «нормы» служат первыми признаками вредного воздействия на акваторию. Во вторую очередь негативное влияние будет проявляться на барьерах, являющихся также важными объектами мониторинга и контроля за геоэкологической ситуацией. Наблюдения в пределах континуума, с точки зрения фиксации экологических изменений, будут менее эффективны в силу вторичности их проявлений по отношению к пограничным средам.

Существует два основных подхода к оценке *устойчивости*. Широкое распространение получили *экспертные оценки* на основе балльных шкал, основанные на квалифицированном анализе результатов геоэкологических исследований. Они используются применительно к сложным системам, для которых получение прямых количественных значений сопряжено со значительными методическими трудностями. Работа экспертов начинается с установления иерархической системы признаков, на основании которой производится оценка устойчивости геосистемы. Собственно экспертный анализ заключается в установлении оценок значимости и выраженности признаков. Специальная программа выполняет расчет относительных показателей. Одним из способов статистического анализа (например, по критерию Шеффе) оценивается согласованность результатов работы экспертов. При удовлетворительном сходстве интегральных показателей средние балльные характеристики геосистем переносятся в базу данных, реализованную в ГИС. Оценка устойчивости структурных частей геосистемы требует предварительного определения существующего уровня техногенной нагрузки. С этой целью производится полная инвентаризация источников и видов воздействия и расчет их «рейтинговых оценок» по программе.

Наиболее сложным в проблеме является *получение количественных оценок устойчивости*. Математические методы определения численных значений в настоящее время достаточно ограничены. Как правило, это возможно при детальном исследовании устойчивости отдельных компонентов системы к конкретным видам воздействий. Для решения задачи необходимо, прежде всего, количественно охарактеризовать сами воздействия и обосновать пороговые значения для компонентов или параметров геосистемы. При этом могут использоваться следующие критерии:

1. Скорость возврата системы в исходное состояние после воздействия на нее. Например, восстановление численности вида или популяции после аварийного сброса в водный объект загрязняющих веществ.

2. Предел (порог) устойчивости системы к данному возмущающему фактору. При тепловом загрязнении естественного водоема пороговой является температура воды около 28°C, выше которой отмечается повышение на порядок отношения энергии, расходуемой на деструкцию вещества, к энергии, накапливаемой в биомассе, а также изменение продукционно-деструкционного соотношения. Если это соотношение больше 1, функционирование экосистемы нарушается термогенной эвтрофикацией водоема, и она деградирует.

3. Буферная емкость к возмущающему фактору или потенциал устойчивости. Например, интегральным показателем устойчивости почв к кислым атмосферным осадкам служит величина емкости катионного обмена. Примером буферной емкости морской среды к захоронению определенных видов промышленных отходов может являться величина поглощения донными осадками загрязняющих веществ, содержащихся в этих отходах. Параметр определяется в процессе экспериментальных наблюдений.

4. Использование математического аппарата теории надежности и ее важнейшего понятия - отказа, которое в общем виде определяется как событие выхода системы из области допустимых значений ее переменных [Гродзинский, 1987]. Оценкой устойчивости системы является вероятность не возникновения отказа в интервале времени Δt . Однако в основе расчетов должен лежать достоверный статистический материал. Для оценки устойчивости геосистем это требует большого объема мониторинговых наблюдений за средой и ее реакцией на тот или иной вид вредного воздействия.

5. Отыскание интегральных показателей. Так, критерием устойчивости будет служить состояние системы, когда прирост энтропии близок к нулю. Положительный баланс энтропии свидетельствует о потере геосистемой способности к саморегуляции и устойчивости.

Говоря о проблеме устойчивости геологической среды, необходимо отметить, что она обусловлена двумя основными группами факторов: природными, характеризующими саму геологическую среду в ее эволюционном развитии, и техногенными процессами, определяющими внешние воздействия [Мамаев и Куринов, 1998]. Учет второй группы факторов в индустриально развитых районах действительно необходим. Нецелесообразно рассматривать проблему устойчивости территорий без учета территориально-промышленных комплексов на региональном уровне или природно-технических систем на локальном, которые формируют новые природно-техногенные системы, характеризующиеся эмерджентными свойствами. На шельфах, за исключением очень локальных акваторий (например, акваторий портов), техногенные воздействия являются наложенными. По отношению к ним и определяется устойчивость морской среды.

Устойчивость геологической среды шельфа обусловлена особенностями литолого-геохимического состава поверхностного слоя донных отложений, литодинамическими процессами, строением рельефа, выдержанностью гидродинамических параметров среды. Она базируется на критериях качества, которые включают уровень загрязнения придонных вод, степень загрязнения и ассимиляционную способность донных осадков, опасность вторичного загрязнения. Ассимиляционная способность включает сорбционную емкость, интенсивность микробиологической и химической деструкции

загрязняющих веществ. Как правило, ассимиляционная способность осадков и интенсивность вторичного загрязнения находятся в сложной зависимости. Далеко не всегда снижение ассимиляционной активности ведет к интенсификации процессов вторичного загрязнения, что вызвано перестройкой механизмов саморегуляции геосистемы.

Большой интерес представляет оценка *устойчивости морских геосистем к химическому загрязнению* среды как одному из основных видов вредного воздействия. Ведущими механизмами устойчивости к загрязнению воды и донных осадков являются вынос химических ингредиентов, их деструкция и консервация.

Интенсивность выноса загрязняющих веществ за пределы рассматриваемой экосистемы (залива, бухты, определенной акватории и т.д.) осуществляется, главным образом, за счет гидродинамических механизмов: волнения, течений. Чем активнее динамика среды, тем выше вероятность выноса поллютантов за пределы изучаемого участка.

Разрушение или метаболизм веществ реализуется через их окисление, гидролиз, микробиологическую деструкцию и другие процессы, приводящие к распаду вещества на нетоксичные компоненты. Окисляемость органических веществ, играющая заметную роль в их детоксикации, зависит от молекулярного веса, количества атомов углерода и химической структуры вещества. Характерным примером микробиологической деструкции является процесс микробиального дехлорирования полихлорбифенилов в анаэробной среде, что ведет к потере их канцерогенных свойств.

И, наконец, консервация токсичных ингредиентов, под которой понимается перевод их в неподвижные биологически недоступные формы. Этот механизм реализуется посредством физико-химических и биологических процессов: консервация высшей водной растительностью, химическая сорбция, перевод тяжелых металлов в труднорастворимые соединения. Эффективность работы механизмов устойчивости этой группы связана в основном с емкостью геохимических барьеров.

Основными факторами реализации перечисленных механизмов устойчивости морской среды к химическому загрязнению будут выступать: интенсивность течений и волнения (через коэффициент перемешивания воды), содержание в воде растворенного кислорода и глубина окисленного слоя донных осадков, микробиологическая активность (через общее микробное число), процент проективного покрытия дна высшей водной растительностью, физико-химические свойства придонного слоя воды и поверхностного горизонта донных осадков (через значения pH - Eh) и сорбционные свойства осадков (через емкость катионного обмена). Анализ функциональности перечисленных механизмов позволил сделать вывод о том, что максимальное влияние на устойчивость морской среды к химическому загрязнению оказывает динамика воды, микробиологическая активность и окислительно-восстановительные условия на разделе «вода-дно». Перечисленные показатели устойчивости морской среды к химическому загрязнению являются базовыми при проведении экспертных оценок на балльной основе.

2. Литоиндикация в системе геоэкологических исследований.

В условиях все возрастающего антропогенного пресса состояние донных осадков оказывает очень большое влияние на экологические условия водных бассейнов. Это положение обосновывается не только морскими геологами, но и специалистами из других областей знаний. Так, среди гидробиологов существует мнение, что загрязнение донных осадков играет решающую роль в снижении рыбопродуктивности водных объектов и ухудшении ее качества. Особенно этот вывод закономерен для рыб-бентофагов, составляющих основную часть уловов во внутренних водоемах. Важная роль принадлежит донным осадкам при формировании общего токсикологического и санитарного фона водного объекта. Донный материал не только аккумулирует загрязняющие вещества, но в определенных обстоятельствах может служить источником

вторичного загрязнения воды. Химический состав современных донных осадков часто более полно, в сравнении с водой, отражает реальное загрязнение водоема, особенно в отношении большой группы веществ органического происхождения (включая хлорорганические соединения и полициклические ароматические углеводороды), которые гидрофобны и способны к накоплению в основном в донных отложениях и во взвешенном материале.

Донные осадки являются достаточно консервативной системой, способной накапливать и хранить информацию о состоянии и изменениях химических и физико-динамических параметров водной среды в пространственно-временном измерении. Использование данных свойств с целью освещения некоторых геоэкологических и природоохранных вопросов получило в последние годы достаточно широкое развитие. Изучение состава донных осадков способствовало решению многих геоэкологических задач, выходящих за рамки обычной констатации загрязнения водной среды. Среди них следует выделить:

- получение доказательств снижения загрязнения водного объекта в связи с проведением водоохранных мероприятий;
- выявление динамики загрязнения во времени и проведение сравнительного анализа по этому параметру между разными территориями;
- анализ истории поступления в водный объект загрязняющих веществ или их использования в данном регионе;
- оценка баланса масс поступающих загрязняющих веществ в водный объект во времени;
- сравнение состояния искусственных водоемов на основе анализа скоростей осадконакопления как показателя седиментационных свойств водного объекта и интенсивности деструкционно-продукционных процессов;
- использование данных о минералогическом составе для выявления источников загрязняющих веществ и основных путей их переноса.

Свойства донных осадков, их способность накапливать и хранить в себе геоэкологическую информацию позволяют использовать их в качестве литоиндикаторов при оценке общего состояния водного объекта, быстрых экологических изменений, а также в процессе экологического контроля за источниками загрязнения.

3. Техноседиментогенез и процессы вторичного загрязнения.

Исследования на водных объектах Северо-Запада России показали, что в тех случаях когда количество твердого и растворенного материала, поступающего со сточными водами и диффузным загрязнением, сопоставимо с естественным твердым и растворенным стоком в водном объекте или на отдельных его участках, процессы естественного осадконакопления уступают место процессам техноседиментогенеза. Продуктами техноседиментогенеза являются техногенные отложения (илы) [*Опекунов и Холмянский, 2000*].

На основе анализа большого объема фактического материала выделен целый ряд отличий *техноседиментогенеза от естественных процессов формирования осадков.*

1. Отсутствие первых двух стадий седиментогенеза: мобилизации вещества и транспортировки (в природном смысле этого слова) в конечные водоемы стока. Сохранение, хотя и в достаточно трансформированном виде, стадии интеграции и дифференциации материала (одно из отличий формирования техногенных отложений от процесса складирования отходов), где ведущую роль играют состав техногенного материала и динамические факторы дифференциации: в основном физико-химические и химические процессы. Обусловленность процессов техноседиментогенеза действием комплексных техногенных механических и геохимических (геоэкологических) барьеров, среди которых доминируют барьеры окислительно-восстановительного класса.

2. Аномально высокие скорости накопления осадочного материала. По скорости седиментации, которая составляет местами 5-10 см/год, и мощности потока абсолютных масс (3-6 г/см² в год) техногенный тип является самостоятельным вещественно-генетическим типом лавинной седиментации.

3. Важная роль электрохимических процессов на уровне естественных электрических полей (ЕП) в транспортировке и осаждении техногенного материала. Влияние ЕП является одной из причин наблюдаемого несоответствия пространственно-временных закономерностей развития процессов техноседиментогенеза с общепринятыми седиментологическими моделями, т.е. области максимальных градиентов накопления техногенных элементов часто не совпадают с областями наиболее активного накопления современных осадков.

Суть электрохимических процессов состоит в том, что взвешенные в морской воде минеральные частицы обладают электрическим зарядом, величина которого зависит от массы частицы, диэлектрической проницаемости частицы и морской воды, напряженности естественного электрического поля. Направление перемещения частицы под действием локального электрического поля зависит от напряженности поля, диэлектрической проницаемости частицы (ϵ_1) и раствора (ϵ_2). Для случая неоднородного поля частица будет выталкиваться в направлении максимального приращения поля (при $\epsilon_1 > \epsilon_2$) или задерживаться (при $\epsilon_1 < \epsilon_2$). Поле, таким образом, может способствовать накоплению тяжелых металлов или их переносу. Данные о величине заряда коллоидных (субколлоидных) частиц, участвующих в рассматриваемом процессе, позволили оценить максимальную скорость переноса микроэлементов на шельфе под влиянием электрического поля в 0,4 м/с.

4. Высокая концентрация в воде и осадочном материале органического вещества аллохтонного происхождения и, в частности, его легко окисляемых компонентов, а также формирование вследствие этого восстановительных условий в поверхностном слое донных отложений, не связанных с диагенетической стадией преобразования осадка.

5. Преобладающий глинистый (илистый) состав отложений, иногда с би- или полимодальной гранулометрической структурой, специфическими физико-механическими свойствами (высокие показатели влажности и пористости), сохраняющимися по всему разрезу (в среднем 0,5-3,0 м).

6. Высокие концентрации микроэлементов, ассоциации которых, в первую очередь, отражают характер техногенных потоков вещества и специфику геохимических окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий. Загрязненность продуктов техноседиментогенеза тяжелыми металлами, поллютантами органического происхождения, включая ксенобиотики, изменение структуры бактериальных сообществ, определяющих в целом токсичность техногенных илов.

Техноседиментогенез является азональным типом седиментогенеза и практически не регламентируется климатическими, геологическими и тектоническими условиями. Правда, в реальной обстановке в таком виде он проявляется лишь на локальных участках шельфа, но характерен для внутренних водоемов и рек. Требующие дальнейшего уточнения и обоснования ориентировочные количественные критерии (при условии их одновременного выполнения) выделения продуктов техноседиментогенеза - техногенных илов характеризуются следующими величинами: средняя скорость седиментации - более 1 см/год, медианный размер отложений - менее 0,05 мм, поступление абсолютных масс органического углерода на дно - более 150 г/м² в год, высокие по отношению к фоновым (более чем в 100-1000 раз) концентрации токсических веществ.

Термодинамический анализ процессов техноседиментогенеза позволяет рассматривать их как один из способов самоочищения и саморегуляции водной системы. Действительно, поступление потока поллютантов приводит к росту энтропии экосистемы. Механизм саморегуляции работает на снижение энтропии путем выноса ее во внешнюю среду. В противном случае нерегулируемый процесс ведет к деградации системы. В

данном случае основными механизмами снижения энтропии являются фазовые переходы вещества с последующим осаждением основной части твердого материала на дно. Важную роль в механизме дифференциации материала, как отмечалось выше, приобретают химические процессы, в частности, соосаждение ионов металлов в виде плохо растворимых солей и гидроксидов, формирование комплексных химических соединений на основе лигандов. В целом эти процессы приобретают лавинный характер. С другой стороны, в таких условиях вполне естественно снижение динамической составляющей водной среды, что также стимулирует процессы консолидированной аккумуляции осадочного вещества. Энергия потока расходуется на взвешивание материала тем значительнее, чем больше его в воде (высокие концентрации взвеси - характерная черта урбанизированных участков водных объектов). Она передается осредненным движением пульсационному потоку и затем расходуется на поддержание твердых частиц во взвеси. Вероятно, это один из энергетических каналов снижения энтропии и одновременно - одна из причин усиления процесса аккумуляции частиц.

Под *вторичным загрязнением* понимается процесс преимущественного выхода загрязняющих веществ из донных осадков в воду вследствие любого изменения гидро-, лито-динамических и геохимических условий, приводящих к нарушению квазиравновесного состояния на разделе «вода-осадок».

Осаждение загрязняющих веществ в донные осадки не всегда можно рассматривать как процесс самоочищения водного объекта. В случае возникновения риска вторичного загрязнения - это только изменение характера и направленности отрицательного действия.

Поглощение загрязняющих веществ донными осадками и обратный выход в воду зависит от свойств самих веществ, гидродинамического режима, соотношения концентраций загрязняющих веществ в воде и грунтах, буферных свойств воды и донных осадков, величины рН, окислительно-восстановительного потенциала, скорости осадконакопления, мощности осадочного слоя и т.д. К вторичному загрязнению воды следует подходить как к одному из видов вредного воздействия на морскую среду, приводящему к ухудшению качества воды, даже в отсутствие внешних источников загрязнения.

Геоэкологические исследования на водных объектах Северо-Запада России показали, что максимальный риск развития процессов вторичного загрязнения отмечается в осадках, которые по генезису занимают промежуточное положение между природными образованиями и техногенными илами (естественный осадок с наложенным техногенным воздействием). Развитие процессов вторичного загрязнения обусловлено несколькими факторами.

Механическое воздействие (перемешивание, перемещение или взмучивание донных осадков), например, в процессе дноочистных или дноуглубительных работ. Само по себе высокое содержание взвешенных частиц, насыщенных поллютантами минерального и органического происхождения, является существенным фактором загрязнения. В дополнение к этому активизируются процессы десорбции загрязняющих веществ и их поступление из иловой воды.

Изменение окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий поверхностного слоя донных осадков вследствие механического воздействия на него (особенно при перемещении) может активизировать процессы растворения химических веществ и их переход в воду. Сброс грунтов с отрицательным редокс-потенциалом в акватории, насыщенные растворенным кислородом, увеличивает растворимость солей тяжелых металлов, гидроксидов и органоминеральных комплексов, усиливая эффект вторичного загрязнения воды тяжелыми металлами и биогенными компонентами.

Активно участвуют в этих процессах гидрофобные пол-лютанты органического происхождения. При механическом воздействии на поверхностный слой осадков происходит выход этих веществ. Так, при содержании нефтяных углеводородов в донных

отложениях на уровне 300-500 мг/кг нарушение верхнего слоя осадков приводит к всплыванию фрагментов нефтепродуктов и образованию пленки на поверхности воды.

Экологические последствия взмучивания техногенных грунтов можно оценить по результатам изучения токсичности водных вытяжек из донных осадков устьевого участка р. Преголи (г. Калининград), полученных в результате перемешивания донного материала в дистиллированной воде, на тест-объектах *Tetrachymena pyriformis*. Осадки характеризовались комплексным загрязнением тяжелыми металлами, полихлорбифенилами (до 300 мкг/кг) и 3,4-бензапиреном (до 2000 мкг/кг). Опыт, проводившейся при соотношении грунт-вода - 1:20, показал сильное токсическое воздействие на культуру (гибель 18-26% особей). Эти данные еще раз подтверждают высокую «результативность» вредного влияния на водные экосистемы процессов вторичного загрязнения при механическом воздействии.

Физико-химический фактор вторичного загрязнения воды выражен через процессы деструкции органического вещества и химического извлечения связанных форм элементов, процессы десорбции обменного комплекса металлов и диффузию химических веществ из иловых вод.

Деструкция органического вещества с мобилизацией в раствор тяжелых металлов (Сu, Сd, Zn и др.) сильнее проявлены в аэробной среде [Шулькин и Богданова, 1998]. В целом количественная характеристика потока металлов из осадка зависит от целого ряда факторов и может меняться в пределах от первых процентов до десятков процентов от общего содержания в осадке. При поступлении в процессе сброса с промышленных предприятий воды с рН=5,0-5,5 происходит растворение карбонатов. Это особенно существенно, если учесть, что преобладающей формой некоторых тяжелых металлов в условиях техногенного загрязнения является сорбционно-карбонатная (Сd, Ni, Pb и др.). В других случаях снижение содержания в воде загрязняющих веществ ведет к десорбции их из донных осадков, но сами процессы характеризуются длительным периодом действия. При перемешивании поверхностного слоя загрязненных донных осадков интенсивность процессов десорбции многократно усиливается, увеличивая концентрации тяжелых металлов и токсичных органических веществ в воде на порядок [Скакальский, 1996].

Донные осадки как открытая система находятся в непрерывном массоэнергетическом обмене с внешней средой. Этот процесс в обычных условиях (без внешнего воздействия) протекает в основном за счет молекулярной диффузии растворенных химических соединений в иловой воде. Градиент концентраций для большинства элементов направлен из донных осадков в воду. Коэффициент обогащения донных отложений по отношению к воде для некоторых веществ может достигать 10^5 - 10^6 ; для иловых вод к придонным горизонтам воды нередко составляет 10^1 - 10^2 . За счет этого образуется диффузионный градиент, являющийся механизмом молекулярной диффузии вещества в водную среду. В условиях техноседиментогенеза этот градиент может достигать еще больших значений, что благоприятствует более интенсивному развитию процессов.

На морских акваториях в фоновых условиях в силу незначительной интенсивности и большого объема воды диффузионный обмен не оказывают существенного влияния на общий характер геоэкологической обстановки. Однако в портах и на морских акваториях, находящихся под прямым влиянием хозяйственной деятельности человека, воздействие на морскую среду может быть весьма значительным. В Невской губе процессы диффузии в штилевых условиях способствуют увеличению в воде содержания нефтяных углеводородов, Сu, Zn и Pb на 20%, поток меди, цинка и марганца из донных осадков в воду составляет соответственно 19, 67 и 178 мг/м² в год [Скакальский, 1996], что сопоставимо со средними фоновыми величинами потока этих металлов на дно в шельфовом осадконакоплении (45, 165, 538 мг/м² в год).

Биологический фактор вторичного загрязнения морской среды в определенных условиях играет заметную роль. К данному фактору следует отнести процессы

биологического окисления веществ с переводом поллютантов в подвижные формы, поглощение загрязняющих веществ организмами-бентофагами и вовлечение их в биологический круговорот, процессы биотурбации и бактериальной сульфатредукции. Вероятно, наиболее существенными в условиях техногенного седиментогенеза являются два последних процесса.

Деятельность макробентоса усиливает процессы поступления загрязняющих веществ в воду за счет биотурбации донных осадков. Роющие организмы активно проявляют себя в основном в поверхностном слое осадков, что обусловлено присутствием кислорода. О значимости процессов биотурбации свидетельствуют многочисленные данные [Бреховских и Вишневецкая, 1994]. В присутствии хирономид наблюдается увеличение потока из донных осадков в воду: кремния - в 2-3 (до 10) раза, общего фосфора - в 2-4 раза, аммонийного азота - до 1 5 раз, железа - до 10 раз, марганца - в 2-4 раза по сравнению с молекулярной диффузией. В анаэробных условиях этот поток прекращается из-за прекращения жизнедеятельности макробентосных форм организмов. Существенно и то, что в процессе рыхления донных осадков увеличивается на 2-3 порядка скорость проникновения кислорода, играющего определенную роль в трансформации геохимических форм загрязняющих веществ.

К вторичному загрязнению правомерно отнесение процессов сероводородного заражения донных осадков с последующим поступлением ядовитого газа в толщу воды. Основной причиной развития этих процессов является сброс большого количества низкомолекулярного органического вещества при неблагоприятном кислородном режиме и поступлении сульфатов. Толчком к развитию процессов микробиологической сульфатредукции может служить замедленный водообмен, спровоцированный искусственными неровностями дна. В анаэробных условиях при отсутствии сульфатов в процессе получения микроорганизмами кислорода происходит восстановление некоторых металлов (железо, марганец) до ионов и выделяется метан.

Основные выводы:

1. В соответствии с континуально-дискретной организацией геосистемы на шельфе выделяются континуумы и два типа геоэкологических границ: границы-разделы (вода-дно, вода-лед, лед-атмосфера, вода-атмосфера, раздел между физическими и биологическими системами) и границы-барьеры (границы распространения галоклина, фронтов постоянных течений, барьер река-море). Сделан вывод о целесообразности определения фона геоэкологических характеристик и параметров только в пределах одного континуума.

2. Анализ устойчивости структур геосистемы шельфа к внешним воздействиям позволил выявить приоритетный ряд мониторинга объектов и районов геологической среды: поверхность раздела сред - барьерная зона - континуум.

3. Свойства донных осадков накапливать и хранить в себе геоэкологическую информацию позволяют использовать их в качестве литоиндикаторов при оценке общего состояния водного объекта, быстрых экологических изменений, а также в процессе экологического контроля за источниками загрязнения.

4. На отдельных акваториях в условиях интенсивного антропогенного воздействия происходит формирование техногенных илов. Механизм их формирования обусловлен процессами техноседиментогенеза, который рассматривается нами как азональный тип седиментогенеза, характеризующийся целым рядом отличий от естественных процессов формирования осадков. Термодинамический анализ позволяет рассматривать техноседиментогенез как один из механизмов самоочищения и саморегуляции водной геосистемы.

5. Вторичное загрязнение - один из видов вредного воздействия на морскую среду. Процессы вторичного загрязнения обусловлены механическими, физико-химическими и

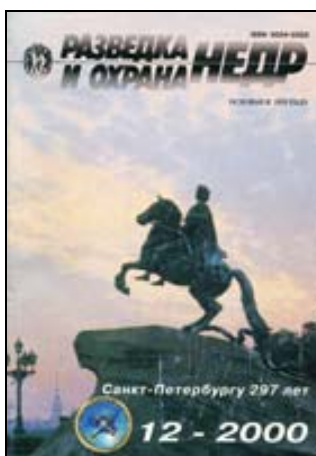
биологическими факторами и в реальных условиях поддаются количественной оценке и прогнозу.

Затронутые в статье проблемы требуют дальнейшего обоснования и углубленного изучения, которое должно базироваться на лабораторно-экспериментальных исследованиях и полигонных наблюдениях в районах, испытывающих значительный антропогенный пресс. Без знания этих вопросов невозможно создать систему рационального и экологически безопасного освоения шельфа, особенно в преддверии крупномасштабного вовлечения акваторий в развитие нефтегазового комплекса страны и создания системы транспортных коридоров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н.* Влияние макробентоса на макрообмен на границе вода-донные отложения (обзор) // Водные ресурсы. 1994. Т. 21.-№ 3. С. 326-333.
2. *Гродзинский М.Д.* Устойчивость геосистем: теоретический подход к анализу и методы количественной оценки // Известия АН СССР. Серия географ. 1987. № 6. С. 5-15.
3. *Мамаев Ю.А., Куринов М.Б.* Вопросы методологии в оценке устойчивости территории // Геоэкология. 1998. № 5. С. 109-126.
4. *Опекунов А.Ю., Холмянский М.А.* Естественные электрические поля и процессы техноседиментогенеза в формировании современных донных отложений водных объектов северо-западного региона России // Русский геофизический журнал. 2000. №17-18. С. 42-54.
5. *Скакальский Б.Г.* Антропогенные изменения химического состава воды и донных отложений в загрязненных водных объектах. Дисс.на соиск.уч.степ. д.г.н. СПб., 1996.
6. *Шулькин В.М., Богданова Н.Н.* Мобилизация Zn, Cu, Cd и Pb в аэрированную морскую воду из суспензий донных осадков // Океанология. 1998. Т. 38. № 5. С. 685-693.
7. *Янин Е.П., Разенкова Н.И., Журавлева М.Г.* Техногенные илы - потенциальный источник загрязнения речных систем // Геоэкологические исследования и охрана недр / Научно-техн.информац. сб. М.: Геоинформмарк, 1992, Вып.1. С. 43-52.

Ссылка на статью:



Опекунов А.Ю., Холмянский М.А. Актуальные направления геоэкологических исследований на шельфе // Разведка и охрана недр. 2000. № 12. С. 66-71.