

УДК 552.14:552.578(26)

ФАЦИАЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ ОБСТАНОВОК ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

© 2004 г. М. А. Тугарова

Санкт-Петербургский государственный университет
198904 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
E-mail: tugarova@netbox.ru

Поступила в редакцию 22.05.2003 г.

Прибрежно-морские обстановки седиментации дельты р. Печоры, Коровинской губы, приливного мелководья Печорского моря характеризуются разнообразием физико-химических процессов, которые определяют дифференциацию минеральных и органических компонентов осадочного вещества. На основе комплексного изучения обширного фактического материала рассмотрены вещественно-структурные и геохимические (в т.ч. и органо-геохимические) особенности осадков различных фациальных обстановок единого латерального ряда с учетом синхронных изменений минеральной и органической составляющих; определены информативные численные показатели, характеризующие осадки отдельных фациальных обстановок, литодинамические и геохимические режимы их формирования; выделены определяющие факторы процессов седиментации – раннего диагенеза. Каждый фациальный тип осадков рассматривается как результат седиментационно-диагенетической дифференциации поликомпонентного вещества в определенных гидродинамических и геохимических обстановках. Наиболее контрастно эти процессы проявляются в условиях дельтового прибрежно-морского комплекса, который является природным литодинамическим и геохимическим барьером.

Седиментогенез – ранний диагенез – это этап формирования первичного состава осадочных отложений, который отражает различные физико-химические условия обстановок осадконакопления и во многом влияет на последующие стадии преобразования осадочного вещества.

В данной работе рассматриваются осадки преимущественно прибрежно-морских обстановок седиментации севера Европейской части России – обводненных северных площадей Малоземельской тундры с примыкающей зоной берегового мелководья (рис. 1). В пределах района выделен следующий ряд фациальных обстановок осадконакопления: континентальные – аллювиальные, озерные (крупных озерных бассейнов, мелких тундровых, часто заболоченных озер); прибрежно-морские – дельтовый комплекс, включающий фации озерно-болотных бассейнов, отмерших озер и проток, каналов твердого стока – проток дельты, авандельты; эстуария (аккумулятивные и абразионные); открытого приливного мелководья (фации пляжа и прибрежно-штормового вала). Непрерывный фациальный ряд позволяет проследить особенности механической и биогеохимической дифференциации осадочного материала, а также выявить особенности начального диагенеза осадков. Термин фация используется в трактовке Г.Ф. Крашенинникова “...как комплекс отложений, отличающихся составом и фи-

зико-географическими условиями образования от соседних отложений того же стратиграфического отрезка” [Крашенинников и др., 1988, с. 3].

Осадки рассматриваются как единая система минеральных и органических компонентов, находящихся в разнофазовом состоянии – твердом, жидком и газообразном со взаимнообусловленными процессами дифференциации вещества.

В работе ставились следующие задачи: рассмотреть вещественно-структурные и геохимические (в т.ч. и органо-геохимические) особенности осадков различных фациальных обстановок единого латерального ряда с учетом синхронных изменений минеральной и органической составляющих; определить информативный набор численных показателей, характеризующих отдельные фациальные обстановки, их литодинамические и геохимические режимы; выделить определяющие факторы процессов седиментации – раннего диагенеза.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обширный фактический материал получен при участии автора в ходе многоцелевой крупномасштабной геохимической съемки, проводимой ВНИГРИ по водоемам и водотокам дельты р. Печоры, Коровинской губы, губы Колоколкова и

приливному мелководью Печорского моря. Уникальность исследованных площадей заключается в том, что позволяет рассмотреть широкий спектр обстановок седиментации – от временных водотоков, ручьев и далее основной водной артерии региона – р. Печоры, дельты р. Печоры со всеми ее специфическими фациями до акватории Печорского моря. В ходе работ были отобраны и проанализированы более 1300 проб. Комплекс аналитических исследований, разработанный коллективом авторов ВНИГРИ [Астафьев и др., 1989], был нацелен на изучение минерального и органического вещества (ОВ) и включал следующие виды анализов: стандартный гранулометрический, а также с применением гидравлического седиментатора ГС-1 [Методические указания ..., 1989], петрографический, минералогический (с определением легкой и тяжелой фракций), рентгенофазовый, определение валентных форм железа, $S_{орг}$, битуминологический с разделением битумоидов по групповому составу, газовую хроматографию, определение сульфатредуцирующих микроорганизмов. Аналитические исследования проводились в лабораториях ВНИГРИ и СПбГУ.

Учитывая особенности геологического строения региона, его углеводородную специализацию и наличие продуктивных локальных структур в дельте р. Печоры, для характеристики седиментационно-диагенетических процессов отбирались пробы, характеризующиеся фоновыми содержаниями газов и битумоидов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ландшафтно-динамическая типизация обстановок осадконакопления. Не останавливаясь подробно на рельефе района исследований, отметим основные ландшафтно-динамические типы обстановок седиментации. В районе губы Колоколкива выделяется серия террас аллювиального и преимущественно лагунно-морского происхождения (высоты 8, 10–15, 20–25, 30–50 и свыше 50 м), прибрежная лагунно-морская низина – лайда. Террасированное побережье прорезается небольшими реками. В пределах приливного мелководья выделяются: мелкие дельты рек, испытывающие воздействие морских приливов, горловины губ с приливной дельтой, пляжевая зона и приливно-штормовой вал. Ландшафтно-динамические формы другого участка работ – дельты р. Печоры показаны на рис. 2.

Гранулометрический состав и литодинамика. Исходя из степени активности придонного гидродинамического режима и особенностей литодинамики, обстановки района работ подразделяются на четыре категории: активные (приливного морского мелководья, абразионные поверхности эстуариев с суммарными скоростями потоков до 200 см/с), умеренно-активные (реки, крупные озе-

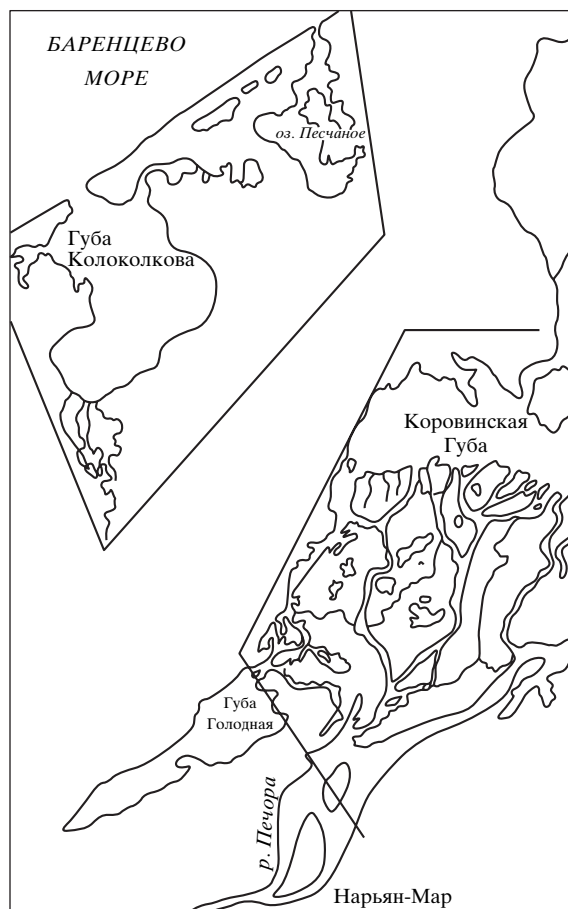


Рис. 1. Схема расположения районов работ. Масштаб 1 : 1 000 000.

ра, каналы твердого стока дельты, авандельты со скоростями потоков до 10–50 см/с), слабоактивные (аккумулятивные зоны эстуариев, отмершие и неактивные озера, протоки дельты и др. со скоростями потоков менее 10 см/с) и пассивные (озерно-болотные и болотные бассейны). Основные литологические и геохимические параметры осадков приведены в табл. 1.

Аллювиальные осадки весьма разнородны по гранулометрическому составу – от смешанных алеврито-глинистых, песчано-алеврито-глинистых до галечниковых в пристержневых частях русла. Русловые осадки более однородны, представлены песками, алевритистыми и алевритовыми песками, глинисто-алевритовыми песками, песчаными алевритами. Медианный размер зерен осадков варьирует от 0.07 до 0.25 мм. Энтропийная мера, отражающая степень сортированности осадков, изменяется в пределах 0.20–0.85 – от хорошо сортированных до несоортированных, в среднем составляя 0.61. Эмпирическое распределение зернистого материала (ЭПР) преимущественно характеризуется модой 0.1–0.125 мм с содержанием в этом классе от 22 до 32% осадочных частиц и

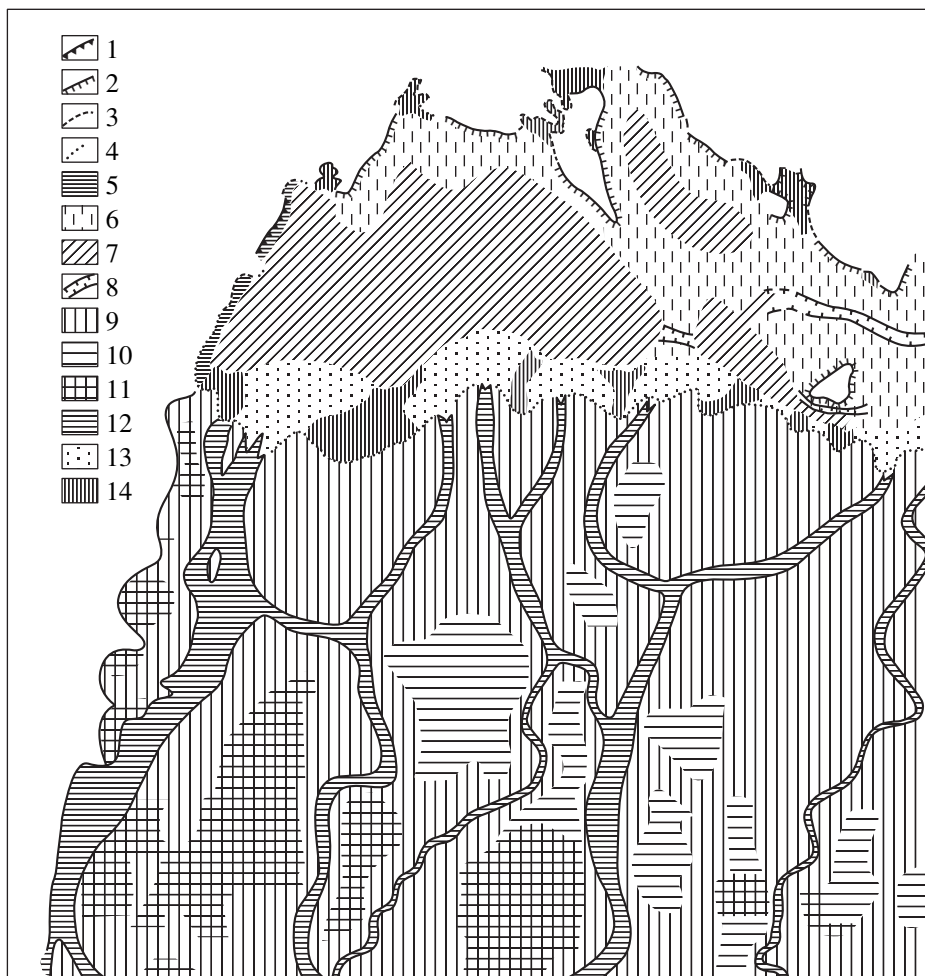


Рис. 2. Схема ландшафтно-динамических форм дельты р. Печоры и Коровинской губы.

1–4 – лагунные формы, берега: 1 – абразия ледниково-морских валунодержущих суглинков, 2 – абразия песчаных осадков прибрежно-морской равнины, 3 – ингрессионно-озерные, 4 – аккумулятивные дельтовые; 5–8 – поверхности дна губы: 5 – абразионные поверхности на ледниково-морских осадках, 6 – абразионные поверхности на лагунно-аллювиальных осадках, 7 – аккумулятивные поверхности на глубинах 2.5–5.0 м и более, 8 – выводные каналы; 9–11 – дельта, равновесные участки: 9 – поверхности с отмершими и неактивными протоками, озерами и болотами, 10 – крупные озерно-болотные бассейны, 11 – озерно-болотные бассейны с уровнем воды, не превышающим меженный уровень проток, 12–14 – неравновесные участки: 12 – протоки (шары) – основные каналы твердого стока, 13 – авандельты, 14 – бассейны бухтовые.

второй модой в классе 0.008-0.01 мм с количеством материала 3-17%. Минимальные содержания зерен отмечены в классах от 0.01 до 0.08 мм. Основная часть русловых осадков формировалась в процессе непрерывного осаждения взвешенного материала из однопаводковых потоков. ЭПР осадков пойм характеризуется, как правило, трехмодальным распределением с модами в песчаных и алевритовых классах с содержанием материала в классе 0.16-0.20 мм до 25%, в классе 0.063-0.08 мм до 20% и в классе 0.008-0.01 мм – до 7%. Дефицит материала приходится на классы 0.08–0.1 и 0.01–0.04 мм. Подобное распределение терригенного материала отражает, прежде всего, многообразие факторов, формирующих пойменные отложения – временные водотоки, паводко-

вые речные воды, аккумуляция в условиях, приближающихся к застойным в период спада паводковых вод. Осадки в различной степени обогащены терригенным ОВ, сносимым с денудированных речных террас, и растительным детритом пойменных почв. Растительный детрит в соответствии с распределением по удельному весу, как правило, попадает в классы размерности меньше 0.05 мм.

Осадки озер – это алевриты, пески и глинисто-алевритовые пески. Медианный размер зерен осадков варьирует от 0.008 до 0.18 мм, в среднем составляя 0.10 мм. Осадки крупных озерных бассейнов представлены песками, алевритистыми и алевритовыми песками хорошо-среднесортированными (энтропийная мера от 0.15 до 0.50).

Таблица 1. Литологические и геохимические параметры осадков различных обстановок седиментации

Параметры	Фациальные обстановки									
	Активные		Умеренно активные			Слабо активные			Пассивные	
	Морские приливные	Абразионные эстуария	Озерные	Аллювиальные	Каналы дельты	Авандельты	Аккумулятивные эстуария	Мелкие тундровые озера	Отмершие озера и протоки	Озерно-болотные
Медианный размер, <i>Md</i> , мм	0.2 0.1-0.23	0.14 0.1-0.16	0.096 0.008-0.18	0.12 0.07-0.25	0.06 0.008-0.13	0.05 0.006-0.11	0.04 0.009-0.08	0.03 0.002-0.06	0.03 0.005-0.05	0.03 0.002-0.09
Энтропийная мера	0.17 0.15-0.20	0.18 0.10-0.55	0.75 0.15-0.90	0.61 0.20-0.85	0.51 0.10-0.92	0.37 0.12-0.90	0.48 0.10-0.78	0.76 0.10-0.90	0.57 0.18-0.92	0.80 0.10-0.92
Тип ЭПР	одномодалый									
Коэфф. общей зрелости	0.90	0.83	0.71	0.79	0.80	0.83	0.74	0.67	0.67	0.62
Содержание, %	0.28 0.24-0.35	0.9 0.71-2.57	2.1 0.20-2.96	0.12 0.45-2.12	2.02 1.01-6.14	1.22 0.78-2.96	2.7 0.80-4.20	0.98 0.20-2.96	2.6 1.0-8.99	3.27 1.23-5.75
$Fe_{закис}$	0.05 0.0-0.08	0.24 0.11-0.97	1.18 0.0-1.84	0.4 0.11-1.28	0.62 0.18-4.22	0.38 0.0-0.96	0.82 0.08-1.28	0.41 0.0-1.84	1.02 0.2-4.22	1.51 0.22-5.46
$Fe_{окис}$	0.07 0.06-0.08	0.27 0.12-1.11	0.55 0.0-0.89	0.32 0.06-0.62	0.63 0.32-1.32	0.42 0.0-1.02	1.07 0.42-2.0	0.12 0.0-0.49	0.72 0.20-4.10	0.85 0.17-1.95
$Fe_{сульфид}$	Н.о.	0 0.0-0.008	0.012 0.0-0.14	0.005 0.0-0.014	0.004 0.0-0.4	0.005 0.0-0.04	0.016 0.0-0.08	0.09 0.0-0.54	0.004 0.0-0.04	0.019 0.0-0.08
$Fe_{облом}$	0.15 0.10-0.22	0.39 0.23-1.04	0.36 0.0-1.00	0.39 0.09-0.63	0.77 0.34-1.34	0.78 0.47-1.07	0.81 0.39-1.28	0.36 0.0-1.0	0.79 0.5-0.9	0.88 0.36-1.59
$Fe_{закис}/Fe_{окис}$	0.77	0.89	2.1	1.25	0.98	0.9	0.77	1.4	3.4	1.8
$C_{орг}$ совр., %	0.2 0.11-0.25	0.34 0.15-1.25	0.87 0.01-3.44	0.71 0.02-3.12	0.86 0.26-2.34	0.5 0.12-1.05	1.14 0.18-1.67	1.37 0.3-6.44	1.53 0.49-3.76	1.8 0.30-14.94
Суммарный диagenетический расход $C_{орг}$, %	0.003 0-0.005	0.013 0.01-0.052	0.04 0.01-0.10	0.026 0.01-0.07	0.037 0.01-0.23	0.025 0.01-0.06	0.057 0.01-0.20	0.049 0.01-0.30	0.058 0.01-0.55	0.097 0.01-0.32
Коэффициент диagenетических потерь	1.7	3.4	4.2	3.5	4.1	4.8	4.8	4.1	3.6	5.3
ХБА, % к осадку	0.002 0.00-0.01	0.006 0.005-0.015	0.019 0.005-0.024	0.01 0.006-0.026	0.012 0.008-0.024	0.014 0.012-0.026	0.19 0.006-0.026	0.0018 0.007-0.024	0.018 0.008-0.024	0.022 0.005-0.021
ХБА/ $C_{орг}$, %	1.2	1.6	1.4	1.5	1.4	2.0	1.7	1.5	1.4	1.3

Примечание. В числителе – средние значения, в знаменателе – пределы изменения.

Осадки неглубоких торфяных озер, обычно смешанного состава, плохосортированные (энтропийная мера от 0.50 до 0.90). Типовые ЭПР осадков выдержаны по форме и положению мод: слабо-выраженная мода 0.20-0.25 мм с количеством материала 2–14%, мода 0.01–0.125 мм с 11–25% материала, модальный класс 0.04–0.05 мм включает 5–23% терригенного вещества. Увеличение терригенного растительного детрита до 15% не меняет вида ЭПР, но приводит к количественному перераспределению по классам, в сторону повышения содержания материала в классах меньше 0.063 мм. В целом осадки озер сформированы при слабом волновом воздействии, скорость их переработки обычно не превышает скорости привноса терригенного вещества. Исключение составляют пески и алевриты глубоких озер, где распределение гранулометрических типов осадков контролируется глубинами водоема и волновым воздействием.

Район дельты р. Печоры характеризуется существенной дифференциацией обстановок седиментации в пределах прибрежно-морской низменности. Осадки озерно-болотных и неактивных водоемов, наследуя от озерных осадков общий характер ЭПР, отличаются смещением мод в классы меньшей размерности и общим увеличением дисперсности терригенного вещества. Для осадков озерно-болотных бассейнов с уровнем воды, не превышающим меженный, свойственны двухмодальные или слабовыраженные трехмодальные типы распределения. Наличие моды в классах размерности меньше 0.04 мм обусловлено как тонкодисперсным минеральным, так и органическим терригенным веществом. Медианный размер зерен в осадках пассивных бассейнов дельты варьирует от 0.002 до 0.09 мм, составляя в среднем 0.03 мм. Осадки плохосортированные, среднее значение энтропийной меры для озерно-болотных осадков – 0.80 и для осадков неактивных озер и проток – 0.57.

ЭПР осадков каналов твердого стока схожи с ЭПР русловых и пойменных осадков. Медианный размер зерен изменяется от 0.008 мм для осадков затишных зон русел и пойменных участков до 0.13 мм для русловых осадков. Степень сортированности варьирует в широких пределах (энтропийная мера от 0.10 до 0.92) – от хорошо сортированных пристрежневых русловых осадков до плохосортированных пойменных. Судя по гранулометрическому составу осадков, в данных водоемах преобладают процессы однонаправленного переноса во взвеси и осаждения терригенного вещества в придонном слое без взмучивания рыхлого материала и его “очистения” от мелкоалевритовых и глинистых частиц.

В авандельте бассейна Коровинской губы на небольшой площади и на малых глубинах разви-

ты различные типы отложений: от песков, глинисто-алевритовых песков и песчаных алевритов до глинисто-алевритовых осадков. Их распределение контролируется рельефом дна и близостью к устью каналов твердого стока. Медианный размер зерен варьирует от 0.006 до 0.11 мм, в среднем составляя 0.05 мм, осадки хорошо сортированные (среднее значение энтропийной меры 0.37). Аккумуляция терригенного вещества происходит путем осаждения взвеси при относительно непрерывном поступлении обломочного материала. Накопление ОБ в основном связано с отложением взвешенных и растворенных в воде органических частиц.

В пределах эстуариев (губа Колоколкова, губа Коровинская) распределение и накопление осадков контролируются батиметрией водоемов, активностью волновых процессов, глубиной волнового воздействия. В пределах эстуариев выделяются две резко отличные обстановки – абразионная и аккумулятивная. Осадки абразионных фаций (вдольбереговых и до глубин 2.5 м) представлены хорошо сортированными песками со средним медианным размером зерен 0.14 мм. ЭПР осадков этих обстановок отражает активный гидродинамический режим седиментации. На песчаные классы приходится до 90% всего материала.

На аккумулятивных поверхностях эстуариев на глубинах более 2.5 м происходит активное накопление тонкодисперсных осадков со средним медианным размером зерен 0.04 мм, преимущественно песчано-глинистых, глинистых алевритов. До 85% обломочного материала приходится на классы размерности менее 0.05 мм, с основной модой распределения в классе 0.008 – 0.001 мм или со смещением моды в класс 0.005 – 0.0063 мм.

Характерные осадки зоны приливного морского мелководья – пески прибрежно-штормового вала и пляжа. Алевритовых фракций в них очень мало, частицы глинистой размерности полностью отсутствуют. Средний медианный размер песчаных отложений пляжа и прибрежно-штормового вала составляет 0.20 мм при небольшом разбросе значений (0.19–0.21 мм). Пески хорошо сортированные (для пляжевых песков энтропийная мера – 0.18, для осадков прибрежно-штормового вала – 0.16), со слабым разбросом значений коэффициента сортированности. ЭПР осадков приливной мелководной зоны отражает интенсивную волно-прибойную переработку обломочного материала с преобладающим осаждением средне-мелкозернистых песчаных фракций.

Структурная зрелость осадочного вещества, определяемая процессами механической дифференциации, тесно связана с минеральной зрелостью осадков.

Минеральный состав осадков. Литодинамика среды седиментации определяет не только структурные особенности формирующихся отложений, но и их компонентный состав.

Песчано-алевритовые фракции осадков района исследований характеризуются увеличением степени зрелости минерального вещества (повышение содержания кварца и относительное уменьшение полевых шпатов и обломков пород) от континентальных водоемов с умеренно активным литодинамическим режимом к активным прибрежно-морским.

Средние содержания кварца меняются от 56.2% в литодинамически слабоактивных фациях отмерших озер и проток дельты до 79% в наиболее динамичных фациях приливного мелководья. Относительно низкие содержания кварца (среднее – 57%) фиксируются в отложениях аккумулятивных зон Коровинской губы, что, по-видимому, связано с уменьшением размерности зернистого материала в этих фациях. В осадках умеренно-активных обстановок содержания кварца варьируют от 60 до 68%.

Для оценки общей зрелости минерального вещества осадков использовалась схема Р.К. Селли [Селли, 1981], которая показана на рис. 3. Для осадков каждой фации рассчитывались средние коэффициенты структурной (отношение содержания зерен к сумме зерен и матрикса) и минеральной (отношение содержания устойчивых зерен к сумме устойчивых и неустойчивых) зрелости. Среднеарифметическое значение этих показателей принималось за общую зрелость осадка.

В результате по возрастанию степени зрелости получен следующий ряд осадков (см. табл. 1): озерно-болотные (0.62) → отмерших озер и проток (0.67) → озерные (0.71) → аккумулятивные эстуариевые (0.74) → аллювиальные (0.79) → каналов твердого стока дельты (0.80) → → авандельты и абразионных эстуариевых (0.83) → пляжа и прибрежно-штормового вала (0.90). Для фаций авандельты и абразионных фаций эстуария при одинаковом коэффициенте общей зрелости варьируют значения структурной и минеральной зрелости. Осадки абразионных обстановок характеризуются более высокой структурной зрелостью, а осадки авандельты – минеральной.

При изучении тяжелых минералов песчано-алевритовых фракций осадков особое внимание уделялось минералам, способным активно реагировать на изменения окислительно-восстановительных условий среды. Обращает на себя внимание тот факт, что количество хлоритов, сидерита, сульфидов железа, в меньшей степени оксидов железа в песчано-алевритовых фракциях осадков сравнительно мало, слабо меняется в отложениях разных обстановок седиментации и не коррели-

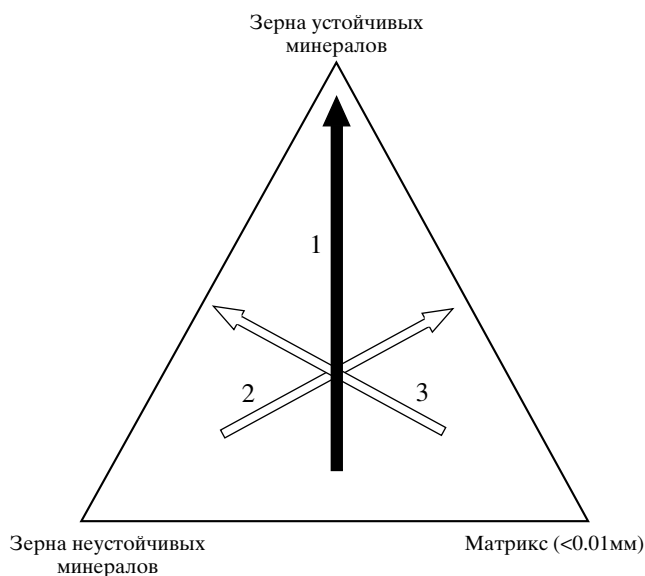


Рис. 3. Диаграмма зависимости состава осадков от структурной и минеральной зрелости. Стрелки – увеличение зрелости: 1 – общей, 2 – структурной, 3 – минеральной.

руется с аналитическими данными по содержанию реакционноспособного и обломочного железа в тех же пробах осадков, что резко отличает крупнозернистый материал от тонкозернистых фракций – мелкоалевритовой (0.01–0.005 мм) и пелитовой (<0.005 мм).

Состав пелитовой фракции осадков. Содержание в осадках тонкодисперсного материала определяется литодинамическими особенностями бассейнов седиментации. Максимальное содержание пелитовой фракции зафиксировано в осадках отмерших озер и проток дельты (до 40%) и аккумулятивной зоне Коровинской губы (до 45%). Ассоциации глинистых минералов в различных фациальных типах осадков в пределах исследованных площадей имеют весьма пестрое распределение. В осадках речных, озерных, аккумулятивных эстуариевых преобладают гидрослюды и каолинит. Каолинит и Mg-Fe-хлорит доминируют в осадках озерно-болотных бассейнов. С увеличением хлорита, как правило, в глинистой фракции фиксируется и сидерит. В осадках с застойным режимом седиментации (болотные, озерно-болотные бассейны дельты р. Печоры) определен пирит в количестве до 6% от глинисто-алевритовой фракции. Максимальные содержания смектитов и смешанослойных минералов типа иллит-смектит отмечены в осадках устьевой части проток дельты (до 35–48%), что, возможно, отражает воздействие более щелочных морских вод на направленность трансформации глинистого вещества. По данным О.В. Суздальского с соавторами [1997], рН придонного слоя воды в устьевой части дельты меняется от 7.0 до 8.0. Понижение содержаний

сметитов в осадках аккумулятивных обстановок Коровинской губы, по-видимому, связано с их транзитом в составе тонкодисперсной взвеси через акваторию губы.

На дифрактограммах глинистых фракций осадков, характеризующихся повышенным содержанием $S_{орг}$, зачастую фиксируется “гало” с максимумом 3.5 Å, характерное для ароматических структур [Корчагина, Четверикова, 1976]. Обычно в этих образцах одновременно идентифицируются повышенные содержания сорбционно-активных глинистых минералов (сметитов, смешанослойных типа иллит-сметит и хлорит-сметит с содержанием разбухающих межслоев до 35%). Можно предположить формирование в осадках подобного типа органоминеральных комплексов, обусловленных вхождением молекул ОВ в структуры разбухающих минеральных фаз. При изучении тех же образцов в шлифах в них отмечено рассеянное ОВ, неразличимое морфологически, но окрашивающее глинистые минералы в темные тона.

Распределение содержаний $S_{орг}$ и форм железа. Средние значения $S_{орг}$ и разных форм железа в разнофациальных осадках приведены в табл. 1. Для литодинамически активных обстановок седиментации характерны осадки с низкой сорбционной емкостью, низким содержанием ОВ (средние значения $S_{орг}$ – от 0.14 до 0.34%) и малыми концентрациями реакционноспособных форм железа (пределы изменения средних содержаний – 0.12–0.51%) при полном отсутствии сульфидного железа ($Fe_{сульфид}$).

В осадках умеренно-активных обстановок седиментации средние содержания $S_{орг}$ варьируют от 0.50 до 0.86%. Средние содержания железа общего ($Fe_{общ}$) изменяются от 1.0 до 2.0%, закисного ($Fe_{зак}$) от 0.38 до 0.62%, пределы изменения концентраций $Fe_{сульфид}$ – 0–0.04%.

Для осадков литодинамически пассивных обстановок характерно максимальное накопление органического материала. Средние содержания $S_{орг}$ – от 1.14 до 1.78% (максимальные до 15%). Средние концентрации реакционноспособного железа – более 1.7%, $Fe_{зак}$ – от 0.85 до 1.07%, существенно возрастает содержание $Fe_{сульфид}$ – до 0.08%.

Закономерное изменение отношения $Fe_{зак}/Fe_{ок}$ в осадках свидетельствует о смене геохимических условий от окислительных до слабовосстановительных и восстановительных по мере снижения активности гидро- и литодинамических процессов. В литодинамически активных обстановках окислительные условия развиты более чем на 70% площади дна, в то время как в литодинамически пассивных фациях озерно-болотных бассейнов дельты р. Печоры доминируют обстановки от слабовосстановительной до восстановительной.

Сульфатредуцирующие бактерии. Распределение сульфатредуцирующих бактерий (преимущественно *Desulfovibrio desulfuricans*) служит критерием, позволяющим оценивать геохимическую обстановку осадков и интенсивность проявления восстановительных процессов. В высокодинамичных хорошо аэрируемых обстановках сульфатредуцирующие микроорганизмы практически отсутствуют. В устьевых частях проток дельты содержание микроорганизмов не превышает 100 клеток/г осадка. Наиболее пестрая картина в их распределении наблюдается в фациях наземного дельтового комплекса, где содержания сульфатредуцирующих бактерий варьируют от 100 до 10 000 клеток/г осадка. Максимальные концентрации микроорганизмов обнаружены в осадках с высоким содержанием сорбционно-активных частиц, ОВ и биохимических газов, приуроченных к динамически слабоактивным – пассивным обстановкам седиментации с восстановительным геохимическим режимом.

Фациальная дифференциация органического вещества осадков. ОВ вместе с минеральными частицами, поступая в результате денудации в континентальные водоемы, включается в единый литогенетический процесс, подчиняясь общим закономерностям механической и химической дифференциации.

Содержание, состав, распределение и основные закономерности дифференциации органического вещества осадков определяются, во-первых, природными биоценозами, во-вторых, особенностями литодинамических процессов и, в третьих, геохимическими условиями донных осадков, определяющими степень сохранности исходного ОВ, т.е., в целом, фациальными особенностями обстановок седиментации – раннего диагенеза.

Главной тенденцией в распределении детритного ОВ является уменьшение его размерности на путях переноса от источника сноса до бассейнов аккумуляции. Детритное ОВ активно участвует в формировании структуры осадков. В результате моделирования процессов осаднения на гидравлических седиментометрах показано, что формирование второй моды ЭПР в мелкозернистых песчаных, алевритовых или пелитовых классах (в зависимости от гранулометрического типа осадков) связано с их обогащенностью детритным ОВ.

Органический детрит присутствует в ограниченном количестве или отсутствует вообще в осадках литодинамически активных обстановок; в отложениях умеренно активных и слабоактивных водоемов морфологически оформленные частицы ОВ приурочены к мелкозернистым песчаным и алевритовым классам; в осадках пассивных

обстановок органический материал чаще всего присутствует в составе глинистого матрикса.

Для осадков рассматриваемых обстановок седиментации, включая дельтовые, прибрежно-морские и шельфовые, доминирующим является аллохтонный органический материал наземного происхождения – ОВ III типа, по А.И. Данюшевой с соавторами [1990]. Это определяется близостью основного источника поступления ОВ в водоемы – денудированного почвенно-растительного слоя водоразделов. Низкие температуры субарктического пояса обуславливают ограниченную продуктивность гидробионтов и, как следствие, относительно малое содержание автохтонного ОВ в осадках прибрежно-морских и континентальных обстановок седиментации.

Аналитические данные подтверждают преобладание во всех изученных пробах ОВ гумусового типа, количество которого несколько уменьшается в общем содержании ОВ при переходе от континентальных осадков к морским (понижение индекса нечетности n -алканов – СРІ, относительное увеличение отношения газов CO_2/CH_4 и т.д.). Как было показано выше, валовый показатель содержания ОВ в осадках – $C_{\text{орг}}$ тесно связан с литодинамическими условиями бассейнов седиментации, уменьшаясь от динамически пассивных к активным. При этом пределы изменения концентраций $C_{\text{орг}}$ оказываются тем ниже, чем однороднее состав осадков в пределах одной фациальной обстановки. Рассчитанный диагенетический расход $C_{\text{орг}}$ изменяется в среднем от 0.003% в осадках пляжа до 0.097% в озерно-болотных. Так же последовательно изменяется и коэффициент диагенетических потерь (отношение суммарного диагенетического расхода $C_{\text{орг}}$ к $C_{\text{орг}}$ исходному, умноженному на 100%) от 2.5 в осадках литодинамически активных обстановок до 5.3 – в пассивных. Сопоставление средних значений $C_{\text{орг}}$ в осадках определенных гранулометрических типов и среднефациальных содержаний $C_{\text{орг}}$ показало, что разброс значений для песков, алевритов, глин в пределах одной фациальной обстановки зачастую оказывается незначительным при существенных различиях средних фациальных содержаний.

Таким образом, дифференциация ОВ происходит синхронно с дифференциацией терригенного вещества, при этом гранулометрический состав осадков связан с определенным морфологическим типом ОВ, его количественными и качественными характеристиками.

Распределение в осадках хлороформенных битумоидов (ХБА). Определение количества битумоидов и изучение их группового состава позволяют получить информацию о генетическом типе исходного органического вещества, а также о

степени его трансформации на стадии раннего диагенеза.

Содержание ХБА в осадках изученных фациальных обстановок варьирует в широких пределах от $n \times 10^{-4}$ до $n \times 10^{-1}\%$. Общей тенденцией в распределении ХБА является их увеличение с ростом количества в осадках $C_{\text{орг}}$. Фоновые содержания колеблются от $n \times 10^{-3}$ до $n \times 10^{-2}\%$. Максимальным средним значением характеризуются осадки озерно-болотных бассейнов (0.022%), затем озерные и аккумулятивные фацис эстуариев (0.019%), отмерших водотоков дельты (0.018%); близкие значения определены для осадков аванделты (0.014%), каналов твердого стока дельты (0.012%), аллювиальных (0.010%) и минимальные – в абразионных осадках эстуариев (0.006%), приливного мелководья (0.002%). Значения ХБА/ $C_{\text{орг}}$ невелики – от 1.0 до 2.6%, что характерно для осадков на раннедиагенетической стадии, но вариации этого показателя свидетельствуют о различии в интенсивности преобразования ОВ в различных фациальных типах осадков. При этом отношение ХБА/ $C_{\text{орг}}$, отражающее степень преобразованности исходного ОВ, оказываясь максимальным в осадках аванделты (2.6%) и аккумулятивных фацис эстуариев (1.7%), далее последовательно убывает в ряду осадков: абразионных обстановок эстуариев (1.6%), аллювиальных (1.5%), озерных, отмерших водотоков и каналов твердого стока дельты (1.4%), озерно-болотных бассейнов (1.3%), шельфовых (1.1%) прибрежно-морского вала и пляжа (1.0%).

Интересно, что в целом более высокие значения ХБА/ $C_{\text{орг}}$ ($>1.3\%$) характерны для осадков с высоким коэффициентом диагенетических потерь ($>3.4\%$). Прямой корреляционной зависимости между этими величинами нет, так как относительное накопление битумоидов связано не только с диагенетическими потерями $C_{\text{орг}}$, но и с генетическим типом накапливающегося ОВ (количеством исходных липидов). Гидробионтное вещество, являющееся основным поставщиком липидов, по-видимому, вносит свой вклад в формирование ОВ эстуариев, за счет чего и происходит дополнительное относительное увеличение значений ХБА/ $C_{\text{орг}}$ в осадках аванделты и эстуариев.

Для осадков различных обстановок седиментации распределение ХБА и их группового состава закономерно изменяется в зависимости от литодинамической активности водоемов. Максимальные содержания масляной фракции в составе битумоидов характерны для осадков шельфа, эстуариев (до 68%) и минимальны для береговых абразионных и флювиальных отложений (7–8%). В осадках различных обстановок седиментации – от активных абразионных до пассивных аккумулятивных закономерно увеличиваются

Таблица 2. Средние содержания битуминологических показателей и пределы их изменения в различных гранулометрических типах осадков и фациальных обстановках

Типы осадков	C _{орг} , %	ХБА, % к осадку	Содержание УВ, %	
			в осадке	в ХБА
Пески	$\frac{0.55}{0.14-0.91}$	$\frac{0.009}{0.002-0.020}$	$\frac{0.002}{0.000-0.0038}$	15
Алевриты	$\frac{0.77}{0.42-0.97}$	$\frac{0.016}{0.009-0.021}$	$\frac{0.0021}{0.0011-0.0028}$	12
Глины	$\frac{1.12}{0.62-1.68}$	$\frac{0.019}{0.013-0.022}$	$\frac{0.0023}{0.0018-0.0026}$	12
Пределы изменения средних значений в различных фациальных обстановках				
	0.14–1.78	0.002–0.022	0.0005–0.0036	9–19

Примечание. В числителе – средние значения, в знаменателе – пределы изменения.

средние содержания C_{орг} (от 0.41 до 1.32%), ХБА (от 0.006 до 0.020%), масляной фракции (от 0.0005 до 0.0038%), смолисто-асфальтеновой (от 0.0056 до 0.0169%), суммарное содержание углеводов (УВ) (от 0.0005 до 0.0036%).

Максимальное содержание метано-нафтеновых УВ зафиксировано в осадках аккумулятивных обстановок эстуария (Коровинская губа) – 0.0045%, с преобладанием в составе метано-нафтеновой фракции n-алканов – до 94% (интервал n-алканов – C₁₇–C₄₀). Специфическое распределение спектра n-алканов (относительное преобладание высокомолекулярных нечетных гомологов C₂₅–C₂₉, высокие коэффициенты нечетности n-алканов – от 2.0 до 5.9) отражают доминирующую роль ОБ растительного происхождения и его слабую диагенетическую преобразованность.

В составе изопреноидов преобладают пристан и фитан. Величина отношения пристана к фитану колеблется в интервале 0.5–1.4, оказываясь минимальной (0.5) в озерно-болотных осадках дельты р. Печоры и определяется как генетическими особенностями ОБ, так и окислительно-восстановительными условиями среды.

В полиароматической фракции масел осадков, незагрязненных техногенными нафтидами, преобладают хризен, алкилхризен и перилен, в меньшей степени фенантрен и его производные. В единичных случаях зафиксировано присутствие бенз(а)пирена и некоторых других ПАУ.

Данные по содержанию в осадках ХБА, их групповому составу и УВ-составляющей свидетельствуют о решающей роли фациального фактора в их распределении. Литодинамически активные обстановки неблагоприятны для аккумуляции и сохранности ОБ в целом и его УВ-составляющей в силу низкой сорбционной емкости отложений, практически полного отсутствия органического детрита и активного газообмена,

обеспечивающего окислительный режим в поверхностных горизонтах осадков.

Условия остальных фациальных зон в разной степени благоприятны для аккумуляции ОБ, в том числе УВ. Наличие сорбционно-активного алеврито-глинистого матрикса, дисперсного ОБ, преобладание нейтральных до восстановительных геохимических условий обеспечивают аккумуляцию УВ и их сохранность в условиях раннего диагенеза.

Фоновые содержания органического вещества и его отдельных компонентов были определены как для различных обстановок седиментации, так и для отдельных гранулометрических типов осадков. В табл. 2 приведены среднефоновые значения распределения C_{орг}, ХБА, углеводородных фракций в составе осадков и ХБА и пределы их изменения.

Из данных табл. 2 видно, что пределы изменения средних содержаний в различных гранулометрических типах осадков оказываются минимальными при существенной дифференциации ОБ и его отдельных компонентов внутри каждой группы близких по гранулометрическому составу осадков. При этом дифференциация значений для различных гранулометрических типов осадков в пределах континентальных и прибрежно-морских обстановок седиментации зачастую оказывается незначительной при существенных различиях средних значений в различных фациальных зонах. Эти данные еще раз свидетельствуют о доминирующей роли фациального фактора в распределении ОБ.

Газовая фаза осадков. Процессы раннедиагенетической трансформации ОБ приводят к образованию широкого спектра биохимических газов. В табл. 3 приведены значения концентраций углеводородных газов, азота, углекислого газа, а также общей газонасыщенности. Средние содержа-

Таблица 3. Химический состав газовой фазы осадков

Обстановки осадконакопления	Газонасыщенность	Химический состав газов, см ³ /дм ³			CO ₂ /CH ₄
		CO ₂	N ₂	CH ₄	
Приливное мелководье	$\frac{12 (12.0)}{5.0-19.0}$	$\frac{1.5 (0.9)}{0.2-4.0}$	10.4 (10.3)	$\frac{0.01 (0.02)}{0.004-0.06}$	$\frac{140.0 (50.0)}{3.3-575}$
Абразионные Коровинской губы	$\frac{29.0 (16.0)}{5.0-72.0}$	$\frac{10.6 (8.8)}{2.5-25.6}$		$\frac{0.6 (0.4)}{0.02-5.9}$	$\frac{18.5 (7.5)}{0.07-109.0}$
Крупных озер	$\frac{95.0 (67.0)}{15.0-370.0}$	$\frac{48.0 (31.0)}{0.7-239.0}$	33.0 (27.0)	$\frac{13.7 (4.0)}{0.01-76.2}$	$\frac{67.5 (10.0)}{0.3-470}$
Средних и малых озер	$\frac{95.0 (79.0)}{27.0-260.0}$	$\frac{31.0 (19.0)}{3.4-106.0}$	33.0 (29.0)	$\frac{31.4 (20.0)}{7.0-117.0}$	$\frac{1.0 (0.9)}{0.3-3.5}$
Аллювиальные (нижние течения и устья)	$\frac{86.0 (84.0)}{30.0-130.0}$	$\frac{30.0 (18.0)}{4.4-84.0}$		$\frac{14.4 (16.8)}{0.13-30.0}$	$\frac{27.6 (1.4)}{0.5-220.0}$
Основные каналы твердого стока дельты	$\frac{63.0 (65.0)}{15.0-125.0}$	$\frac{28.0 (23.0)}{0.8-88.0}$	24.0 (24.0)	$\frac{12.6 (8.7)}{0.2-59.0}$	$\frac{12.7 (2.3)}{0.5-176.0}$
Авандельта	$\frac{61.0 (54.0)}{7.0-184.0}$	$\frac{1.8 (1.5)}{0.08-5.7}$		$\frac{13.7 (6.7)}{0.01-96.0}$	$\frac{32.1 (5.0)}{0.13-147.0}$
Аккумулятивные Коровинской губы	$\frac{50.0 (34.0)}{7.0-164.0}$	$\frac{1.5 (0.9)}{0.2-4.0}$		$\frac{7.2 (3.6)}{0.5-34.6}$	$\frac{6.1 (2.6)}{0.3-35.4}$
Отмершие и неактивные озера, протоки	$\frac{112.0 (90.0)}{34.0-295.0}$	$\frac{65.0 (50.0)}{10.0-242.0}$	23.0 (21.0)	$\frac{20.2 (21.5)}{0.5-46.0}$	$\frac{10.7 (2.9)}{0.3-128.0}$
Озерно-болотные бассейны	$\frac{119.0 (117.0)}{47.0-226.0}$	$\frac{65.7 (48.5)}{15.0-166.0}$	29.0 (19.0)	$\frac{24.4 (23.0)}{0.8-45.0}$	$\frac{6.2 (2.0)}{0.3-24.0}$

Примечание. В числителе – средние значения и медианные (в скобках), в знаменателе – пределы изменения. Исследовались осадки естественной влажности.

ния газовой фазы и концентрации ее отдельных компонентов контролируются условиями формирования осадков, степенью их дисперсности и количеством в них ОВ. Максимальные концентрации газов зафиксированы в обогащенных ОВ осадках пассивных озерно-болотных обстановок дельты р. Печоры. Минимальными концентрациями всех газовых компонентов характеризуются осадки высокодинамичных обстановок приливного мелководья и абразионных фаций Коровинской губы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Осадки различных фациальных обстановок различаются по вещественно-структурным и геохимическим параметрам. Определяющими факторами их формирования являются процессы механической и химической дифференциации.

2. Распределение минерального и органического вещества, а также процессы их раннедиагенетической трансформации взаимосвязаны.

3. Каждый фациальный тип осадка отличается составом и физико-географическими условиями

образования, что отражается в наборе информативных числовых критериев.

4. Литодинамически активные обстановки неблагоприятны для аккумуляции и сохранности ОВ в целом и его УВ-составляющей. Остальные фациальные обстановки благодаря таким факторам, как накопление сорбционно-активных тонкодисперсных фракций с сингенетичным ОВ, преобладание нейтральных до восстановительных геохимических условий, в разной степени, но в целом благоприятны для аккумуляции УВ и их сохранности в условиях раннего диагенеза.

Рассмотренные вопросы фациальной дифференциации и раннедиагенетического преобразования поликомпонентного осадочного вещества показывают многофакторность процессов литогенеза и являются теоретической основой для решения прикладных задач литологии, геохимии, нефтяной геологии: оценки рудоматеринского и нефтематеринского потенциала осадков, масштабов современного газообразования, а также решения геоэкологических задач.

Автор выражает благодарность геологам, совместно с которыми проводились полевые исследова-

дования, а также химикам-аналитикам ВНИГРИ, чьи аналитические данные были использованы в работе: А.В. Гончарову, М.А. Галишеву, М.Б. Галишевой, Э.Л. Веселовой, Т.П. Кудрявцевой, В.А. Лобкову, Г.М. Ельцовой, Т.В. Байковой, микробиологам Р.М. Свечиной, З.А. Андреевой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьев В.П., Гончаров А.В., Коц В.Г. и др.* Методика и результаты комплексных биогеохимических исследований в условиях прибрежно-мелководных зон акваторий // Проблемы нефтегазоносности Мирового океана. М.: Наука, 1989. С. 115–121.
- Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С. и др.* Органическое вещество донных отложений полярных зон Мирового океана. Л.: Недра, 1990. 280 с.
- Корчагина Ю.И., Четверикова О.П.* Методы исследования рассеянного органического вещества осадочных пород. М.: Недра, 1976. 229 с.
- Крашенинников Г.Ф., Волкова А.Н., Иванова Н.В.* Учение о фациях с основами литологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 214 с.
- Методические указания по дробному гранулометрическому анализу седиментационным способом (с применением гидравлического седиментатора ГС-1) / Под ред. Гостинцева К.К. Л.: ВНИГРИ, 1989. 191 с.
- Селли Р.К.* Введение в седиментологию. М.: Недра, 1981. 370 с.
- Суздальский О.В., Куликов И.В.* Ландшафтно-литодинамическая схема Печорской губы // Вопросы картирования прибрежного мелководья Баренцева и Белого морей / Под ред. Суздальского О.В. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1997. С. 72–83.