

Секвенс-стратиграфическая модель нижнего мела Западной Сибири

В.А. Жемчугова^{1*}, В.В. Рыбальченко², Т.А. Шарданова¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ПАО Газпром, Москва, Россия

По-видимому, наиболее признанной в настоящее время в геологическом мире методологией прогноза строения осадочных толщ является концептуальная база стратиграфии секвенций (Sequence stratigraphy), в основе которой лежит комплексный анализ сейсмической, стратиграфической и седиментационной информации об осадочных образованиях, структура и фациальное наполнение которых регулируются изменениями относительного уровня моря. В этом отношении нижний мел Западно-Сибирского региона представляет собой уникальный объект, характеризующий весь спектр обстановок обломочной седиментации – от относительно глубоководных до континентальных, чутко реагирующих на смену условий их существования. Возможность использования результатов секвенс-стратиграфического анализа для решения прагматических задач нефтяной геологии базируется на реконструкции процессов седиментогенеза прошлого, а понимание этих процессов – ключ к построению генерализованной осадочной модели, позволяющей разрабатывать модели, применимые к уникальным локальным объектам, встречающимся в нижнемеловом разрезе.

Ключевые слова: Западно-Сибирский регион, секвенс-стратиграфическая модель, секвенции, системные тракты, фации, природные резервуары

Для цитирования: Жемчугова В.А., Рыбальченко В.В., Шарданова Т.А. (2021). Секвенс-стратиграфическая модель нижнего мела Западной Сибири. *Георесурсы*, 23(2), с. 179–191. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.18>

В объеме национальной добычи углеводородных флюидов доля газа, приходящегося на Западно-Сибирский регион (рис. 1), составляет 92%; нефти – 68%. Не менее впечатляющая и ресурсная база этой территории: в ее недрах сосредоточено около 58% общероссийских начальных ресурсов нефти и более 60% – газа. При этом свыше 90% нефти в Западной Сибири добыто из нижнемелового комплекса, а в структуре ресурсов ему принадлежит не менее 50% (Карагодин и др., 2000). Таким образом, нижний мел Западной Сибири – наиболее реальный объект прироста запасов углеводородов (УВ) и их добычи, по крайней мере, в первой четверти XXI века. Однако поиск таких объектов и прогноз их «внутреннего наполнения» сопряжен со значительными трудностями, поскольку продуктивность большей части приуроченных к нижнемеловым отложениям ловушек контролируется не столько структурными, сколько седиментационными факторами. Это означает, что одной из самых актуальных задач, решаемых для прогноза пространственного распределения песчаных тел в локальных объектах, контролирующих их углеводородную продуктивность, является создание геологических моделей, базирующихся на современных представлениях о процессах и механизмах накопления осадочных комплексов различного генезиса. И в этом отношении роль методологического подхода к комплексному анализу геолого-геофизической информации, реализованному в рамках методических приемов стратиграфии секвенций, трудно переоценить.

В нефтяной геологии применение секвенс-стратиграфического анализа позволяет решать две очень важные задачи: во-первых, прогнозировать распределение в структуре осадочно-породного бассейна коллекторов, покрышек и очагов генерации углеводородов (т.е. элементов углеводородных систем); во-вторых, этот анализ является основой для геологического моделирования структуры и свойств природных резервуаров, содержащих УВ флюиды.

В основе стратиграфии секвенций лежит комплексный анализ сейсмической, стратиграфической и седиментационной информации об осадочных комплексах, сложенных «относительно согласной последовательностью генетически взаимосвязанных слоев, ограниченных в кровле и подошве несогласными или коррелятивными им согласными поверхностями» (Mitchum, 1977).

Основным механизмом формирования секвенций являются изменения относительного уровня моря (ОУМ), представляющие собой производные колебаний уровня Мирового океана (эвстатика), скорости погружения или воздымания рассматриваемого участка земной коры (локальная тектоника), а также количество приносимого в приемный бассейн осадочного материала. Эти три фактора определяют объем и скорость изменения аккомодационного пространства, а значит, и стратиграфическую последовательность и особенности распределения полигенных осадков в осадочном комплексе.

На континенте пространство аккомодации, потенциально доступное для осадконакопления, определяется профилем равновесия и поверхностью земли – подводной или субаэральной; в морских обстановках – дном моря и его поверхностью (Jervy, 1988).

* Ответственный автор: Валентина Алексеевна Жемчугова
e-mail: zem@gds.ru

© 2021 Коллектив авторов

Составными частями секвенций являются системные тракты – латеральные фациальные ряды, в структуре которых отображается соотношение скоростей изменения относительного уровня моря и привноса осадков. Каждый из них отвечает определенному положению и фазе движения относительного уровня моря (рис. 2) и фиксирует направленность развития морского бассейна – трансгрессивную или регрессивную, отраженную соответствующим набором слагающих системные тракты парасеквенций.

В рамках секвенс-стратиграфии выделяют два типа регрессий – нормальную и форсированную. В первом случае смещение береговой линии в сторону моря происходит за счет заполнения приемного бассейна в условиях, когда темп повышения уровня моря не обеспечивает достаточного для размещения приносимого осадка аккомодационного пространства; во втором – суша «наступает на море» в результате падения уровня моря.

Разномасштабность колебаний ОУМ порождает формирование в составе осадочных толщ ассоциаций иерархически соподчиненных секвенций. Как правило, особенности распределения в них нефтегазоносных резервуаров контролируются седиментационными циклами продолжительностью 0,1–0,5 млн лет, отвечающих за формирование секвенций IV-V порядка. Именно им в статье уделено основное внимание.

Строение нижнемеловых отложений Западной Сибири во многом определяется морфологией относительно глубоководного морского бассейна, сформировавшегося в конце юрского периода и занимавшего большую часть Западно-Сибирской плиты. В течение первой половины раннемеловой эпохи этот бассейн проградационно заполнялся обломочным материалом, поступавшим в основном с Сибирской платформы и, в меньшей степени, с Урала. Два основных источника сноса обломочного материала предопределили образование в структуре нижнего мела двух систем клиноформенных комплексов – западной и восточной.

В разрезе нижнего мела выделяется около полусотни близких по архитектуре секвенций IV-V порядка, каждая из которых состоит из ундо-, клино- и фондоформенных элементов, сложенных ассоциациями мелководных (прибрежно-морских), склоновых и глубоководных отложений соответственно (рис. 3). Очевидно, что выяснение взаимоотношений между этими элементами является одним из

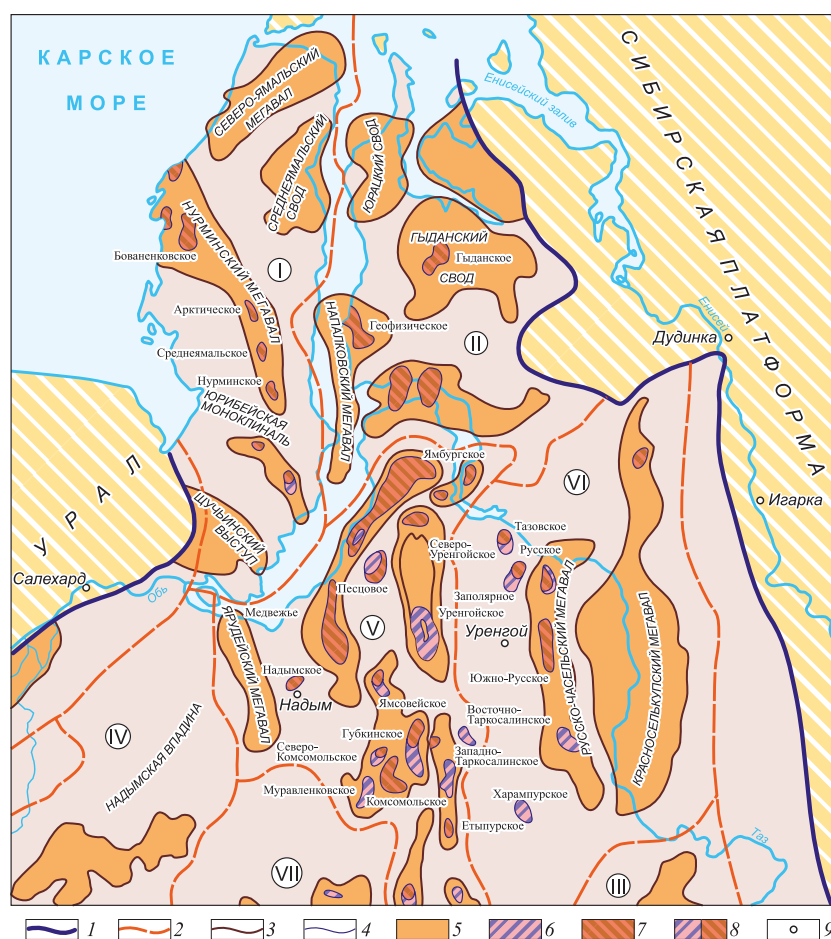


Рис. 1. Карта нефтегазогеологического районирования северной части Западно-Сибирского НГБ (Жемчугова, Бербенов, 2015 по Нефтегазоносные провинции..., 1983, с дополнениями и изменениями): 1–4 – границы: 1 – Западно-Сибирского НГБ, 2 – нефтегазоносных областей (I – Ямальной, II – Гыданской, III – Пайдугинской, IV – Фроловской, V – Надым-Пурской, VI – Пур-Тазовской, VII – Среднеобской), 3 – структур первого порядка (мегавалов и сводов), 4 – контуры месторождений; 5 – мегавалы и своды; 6–8 – месторождения: 6 – нефтяные, 7 – газовые и газоконденсатные, 8 – нефтегазоконденсатные; 9 – населенные пункты

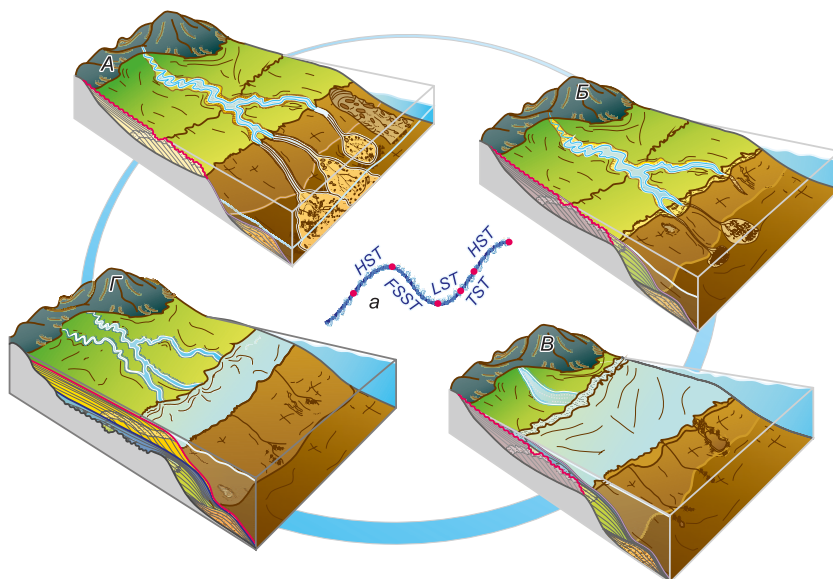


Рис. 2. Объемные модели формирования системных трактов: А – падения относительного уровня моря (Falling stage system tract – FSST); Б – низкого стояния относительного уровня моря (Lowstand system tract – LST); В – трансгрессивного (Transgressive system tract – TST); Г – высокого стояния относительного уровня моря (Highstand system tract – HST); а – теоретическая кривая изменения относительного уровня моря

необходимых условий успешного прогноза распространения продуктивных тел, их литологического состава и картирования зон улучшенных коллекторских свойств.

Выделяемые в разрезе нижнего мела относительно глубоководные (бассейновые) элементы носят название ачимовской толщи. В практике нефтегазопроисловых работ в Западной Сибири используется несколько вариантов индексаций разновозрастных песчаников этой толщи. Наиболее оптимальным из них, на наш взгляд, является индексация, основанная на стратиграфическом соответствии ачимовских песчаных пластов их шельфовым «соседям» внутри единого клиноформного комплекса.

Рассмотрим строение каждого из элементов этого комплекса, исходя из концепции секвенс-стратиграфического анализа.

Тракты падения ОУМ (рис. 2А) в секвенциях присутствуют, как правило, лишь в их фондоформенной части, где выделяются в виде донных конусов выноса. Формирование конусов в значительной мере обусловлено проявлением форсированной регрессии, которая обеспечивала быстрое осушение мелководного шельфа, врезание речных долин и транспортировку по ним обломочного материала в глубоководную впадину. В это время происходило активное разрушение склона: он прорезался каналами, по которым обломочный материал поступал в бассейн; «сползание» вниз по склону нестабильного осадка также провоцировало образование каньонов. Подобные эрозионные формы хорошо видны в волновом сейсмическом поле (рис. 4), и их наличие является одним из необходимых критериев выделения глубоководных песчаных конусов выноса.

Морфология и пространственная локализация донных конусов выноса контролировались, вероятно, как рельефом дна приемного бассейна, так и гидродинамической активностью и плотностью несущего обломки потока, а также количеством и структурными характеристиками переносимого этим потоком обломочного материала.

Пока потоки перемещались вниз по склону и дальше по дну бассейна, они постепенно становились «лучше организованными», разделяясь на высокоплотностные потоки с ламинарным течением и низкоплотностные – с турбулентным. В соответствии с этим, более мелкозернистые осадки концентрировались в верхней части потока, а более крупнозернистые – в нижней.

Поскольку высота турбулентных потоков, как правило, выше, чем гребни близлежащих намывных валов,

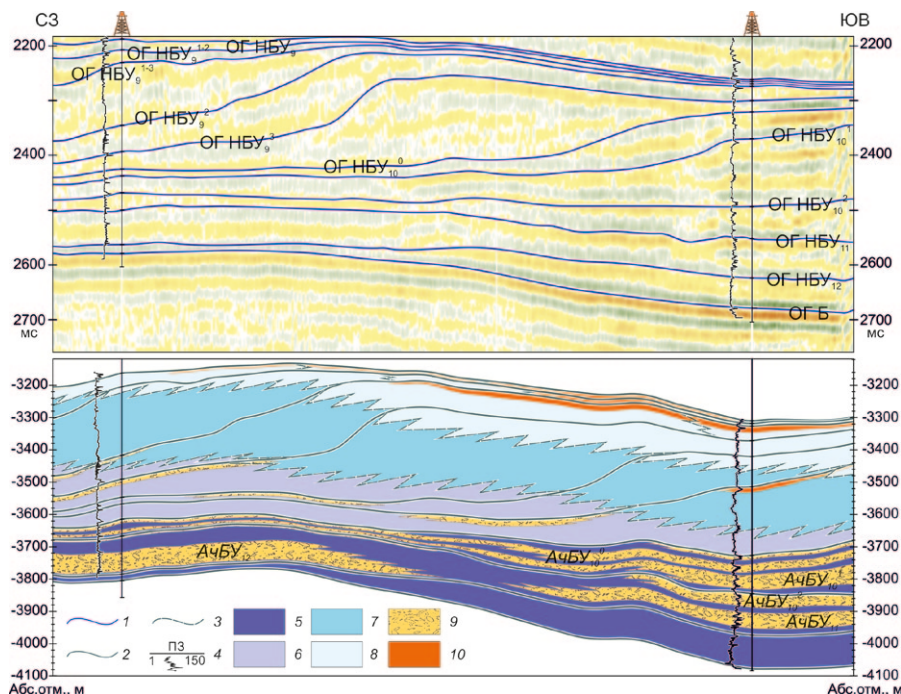


Рис. 3. Сейсмогеологическая модель нижнемелового комплекса северо-восточных районов Западной Сибири (сейсмическая интерпретация К. Эпова): 1 – отражающие горизонты, 2 – поверхности затоплений, 3 – границы литостратиграфических комплексов, 4 – кривая ПЗ ((потенциал зонд); фации: 5 – глубоководного бассейна, 6 – нижней части склона, 7 – склона, 8 – мелководного шельфа и прибрежных зон; песчанники: 9 – донных и склоновых конусов выноса, 10 – побережья

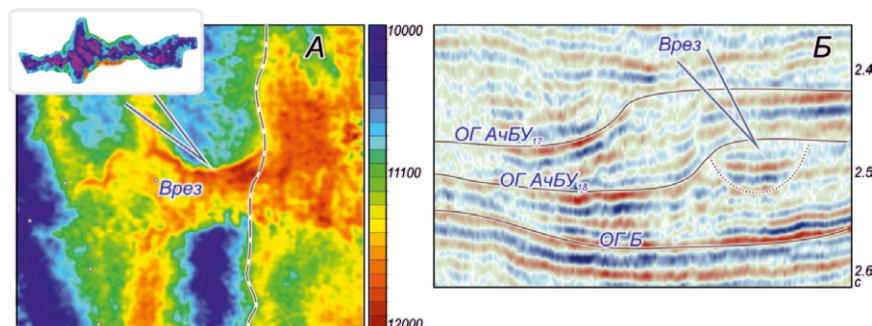


Рис. 4. Отображение крупного вреза в сейсмическом волновом поле: А – на карте псевдоакустического импеданса, Б – на временном разрезе; на врезке – карта времен кровли эрозионного вреза (сейсмическая интерпретация И. Некрасова); восточный склон Уренгойского мегавала

эти потоки были способны широко распространяться латерально, далеко за пределы каналов. В то же время расширение нижней части потока с наибольшим содержанием грубозернистых осадков, лимитировалось стенками канала. Такое своеобразное «переливание через край» приводило к формированию тонкослоистых турбидитовых пакетов насыпных валов, в то время как в русловых условиях накапливались «ССС-турбидиты» (Posamentier, Allen, 1996), характерными признаками которых являются восходящая рябь (Climbing ripples), косая и/или конволютная слоистость (Convolution) и реже обломки пород (Clasts).

Разделение потока провоцировало не только освобождение его нижней части от глинистого материала, но и обеспечивало насыщение им вышележащего низкоплотностного элемента. По мере схода поток насыщался пелитовой фракцией, поэтому его эрозионная способность уменьшалась, и русла становились менее глубокими.

Очевидно, что наиболее вероятным местом в глубоководном бассейне, где будет наблюдаться трансформация «канальных» и «фронтальных» элементов, является переход склона к подножью (рис. 5). Здесь уменьшается крутизна склона, соответственно гасится скорость потока, поэтому процессы эрозии сменяются на процессы аккумуляции.

Снижение скорости движения потока провоцирует разделение его на несколько более мелких подводных русел, которые, выходя на дно впадины, в свою очередь, распадаются на систему мелких проток. В целом, распределение грубо- и тонкозернистых осадков в таких условиях очень похоже на флювиальное осадконакопление на дневной поверхности.

Эволюционная перестройка потока по мере его продвижения отразилась в разрезах конусов выноса присутствием разномасштабных врезов, образованных сходом высокоплотностных потоков, и намывных валов, сложенных преимущественно осадками низкоплотностных потоков. Выдержанность, цикличность и песчаность осадочного разреза определялась его положением в общей системе, формированием в пределах русла или в пределах намывных валов, как прирусловых, так и устьевых. Таким образом, тип потока, а соответственно и песчаность разреза в относительно глубоководных конусах выноса, зависели не только от основных осадкообразующих факторов, действующих у подножья склона, но и от характера самого склона.

Отложения *русловых систем*, накопление которых обусловлено преимущественно высокоплотностными потоками, представлены мощными пластами песчанников (рис. 6).

Выделяется два их основных типа:

1) песчанники мелкозернистые с массивной текстурой; 2) песчанники мелкозернистые с массивной текстурой, со значительным количеством интракластов глинистых и алевро-глинистых пород, имеющих преимущественно угловатую форму, горизонтально ориентированных, либо хаотично рассеянных в основной песчаной массе.

Обилие интракластов указывает на значительный эрозионный эффект, который осуществлял высокоплотностной поток на подстилающие осадки дна. Причем, остроугольность или неокатанность обломков позволяет предположить, что при транспортировке эродировались не только осадки, но и литифицированные породы.

Нередко верхняя часть песчаных пластов обогащена глиной и углистым рассеянным детритом (УРД); появляются разности с градиционной, штриховатой горизонтальной или косой слоистостью. Появление этих разностей объясняется осаждением

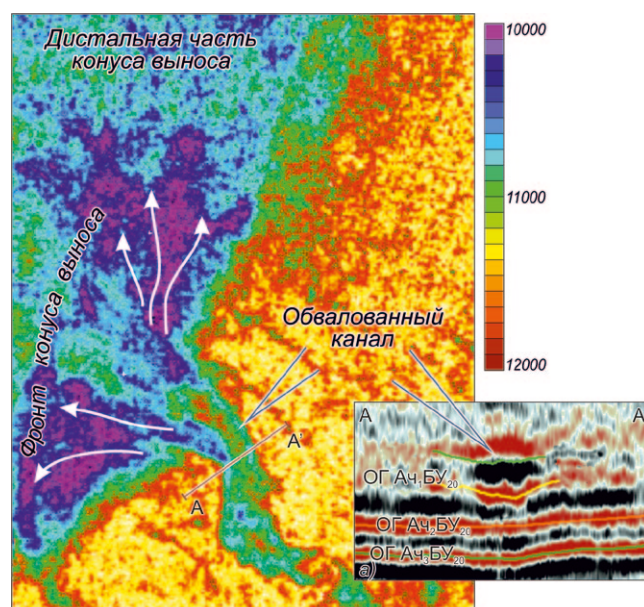


Рис. 5. Пример отображения элементов конуса выноса (АЧБУ₂₀) на срезе куба сейсмических данных: А) фрагмент временного разреза через обвалованный канал

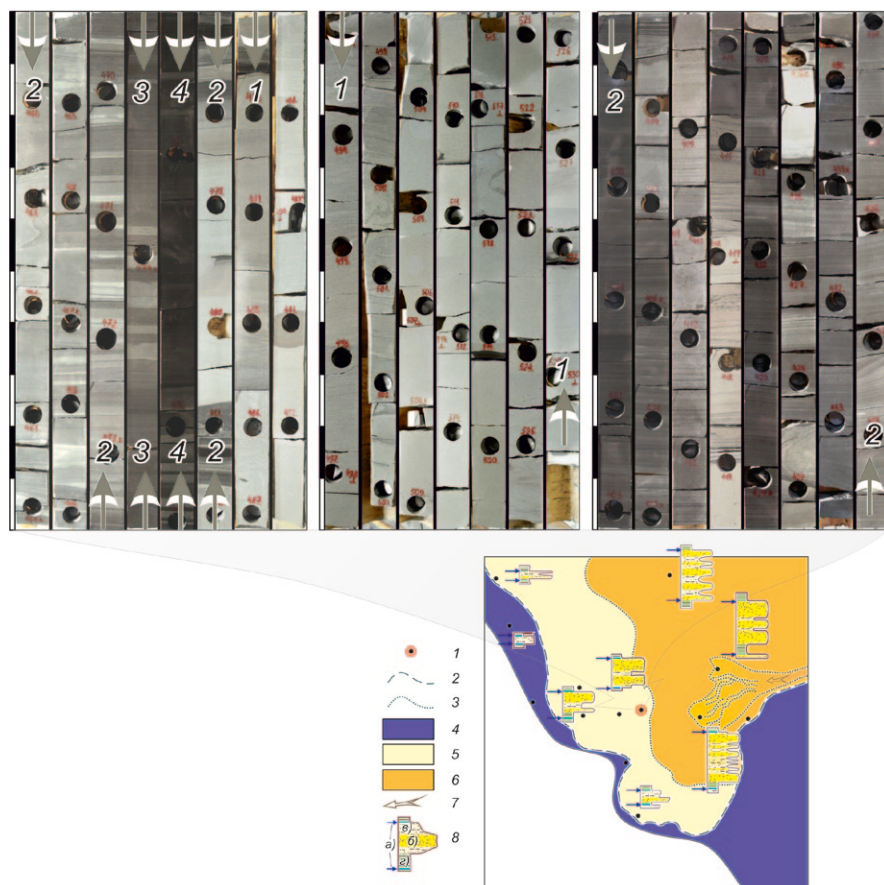


Рис. 6. Особенности строения песчаных пород в разных частях конуса выноса: 1 – песчанники высокоплотностных потоков, сформированных в русловых элементах конусов выноса; 2 – песчано-алевро-глинистые породы намывных валов; 3 – конденсированные глинисто-кремнисто-битуминозные отложения; 4 – отложения «дистальных» частей низкоплотностных потоков; на врезке – фрагмент карты литолого-фациального районирования: 1 – положение изученного разреза, 2 – границы литолого-фациальных зон, 3 – границы русловых систем; зоны преобладающего развития отложений: 4 – глубоководной впадины, 5 – дистальных частей конуса выноса, 6 – фронта конуса выноса, 7 – направление транзита обломочного материала; 8 – литологическая характеристика пород в разрезе конуса выноса (а): б) – песчанники, в) – песчано-алевро-глинистые породы, г) – глинистые отложения

глинистой мути, поднятой и захваченной проходящим высокоплотным потоком.

Нижняя граница песчаных пластов всегда резкая, эрозионная, оползневая. Процессы оползания заметны и внутри слоев песчаников.

В зависимости от положения и стабильности русловой системы песчаные тела могут быть как единичными; в этом случае их мощность не превышает первых метров, так и слившимися, где эта величина достигает нескольких десятков метров.

Намывные валы сложены главным образом отложениями низкоплотных потоков, среди которых преобладают мелкозернистые песчаники, алевролиты, реже алевролитистые глины (рис. 6). В структуре разрезов намывного вала проявляется «классическая» седиментационная цикличность, отвечающая циклам Боума (Bouma, 1962).

Отложения «дистальных» частей низкоплотных потоков представлены маломощными слоями (0,5–2 мм) алевролитов, тонкозернистых песчаников с отчетливыми границами среди глинистых пород. Они встречаются в разрезах как русловых отложений, так и намывных валов, отражая мелкомасштабные процессы гравитационного масс-переноса.

Фоновой седиментации отвечают маломощные прослои глин, неравномерно обогащенных алевролитовым материалом (рис. 6). Последний, вероятно, мог поступать в осадок путем механического выпадения алевролитовой взвеси из «нефелоидной» мути, принесенной в хвостах низкоплотных потоков. Накопление преимущественно глинистых осадков в рассматриваемой части глубоководного бассейна, вероятно, соответствовало периодам дефицита обломочного сноса между сходом потоков разной плотности.

Среди глубоководных отложений наибольший нефтегазопромысловый интерес имеют, несомненно, песчаные тела конусов выноса, особенно в их фронтальной части. Так, на рис. 7 фронт конуса, образованный системой смещавшихся вглубь бассейна распределительных каналов, четко отображается в сейсмических атрибутах и

фиксируется существенным увеличением эффективных толщин коллекторов в разрезах скважин и на карте их прогнозных значений.

Как показывают результаты комплексной интерпретации сейсмических и скважинных данных в реальных объектах отдельные элементы конусов выноса образуют крайне сложную систему распределения песчаных коллекторов и глинистых экранов (рис. 8), учет которой позволяет повысить эффективность освоения связанных с такими объектами залежей углеводородных флюидов.

Как правило, в ундиформенной части секвенции, тракт падения ОУМ отсутствует; времени его формирования отвечает перерыв в осадконакоплении и осушение мелководношельфовой зоны. Однако иногда во время форсированной регрессии создаются условия для седиментации незначительных масс обломочного материала, линзы которого последовательно смещаются в сторону глубоководной впадины (рис. 9).

Подобная ситуация обычно возникает при невысоких темпах уменьшения пространства аккомодации, которая в разрезах скважин отражается в нарушении вертикальной смены фаций: например, осадки, накопление которых происходило в прибрежных условиях «фациально неконформно» перекрывают отложения шельфа и (или) транзитной зоны

Стабилизации падения и началу подъема относительного уровня моря отвечает формирование **системного тракта низкого стояния** (рис. 2Б). На осушенном шельфе в это время начинается заполнение осадком врезанных долин. Но большая часть грубообломочного материала накапливается на узком побережье, прилегающем к глубоководному бассейну. Выносимый в бассейн существенно пелитовый материал формирует клинья низкого стояния, последовательно смещающиеся от склона бассейна к его центру.

В нижней части этого тракта могут присутствовать отложения склоновых конусов выноса, образованных высокоплотными потоками. Основное отличие склоновых и донных конусов заключается в широчайшем развитии и

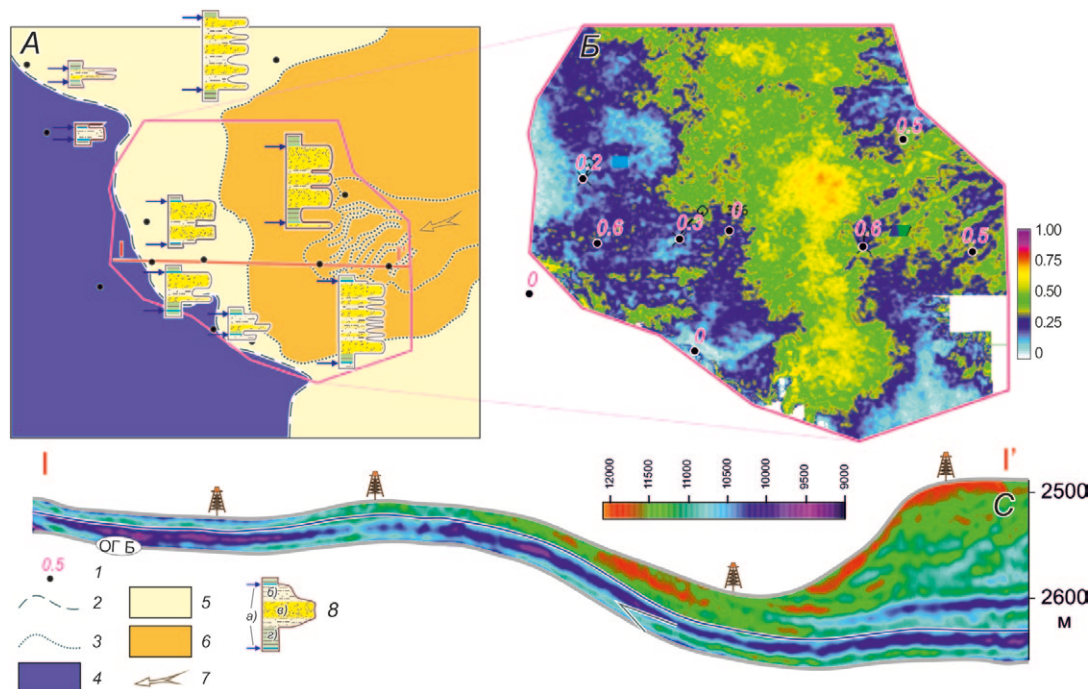


Рис. 7. Сейсмофациальная модель конуса выноса и особенности распределения в нем коллекторов (сейсмическая интерпретация К. Эпова): А – карта литолого-фациального районирования пласта АчБУп; Б – прогнозная карта эффективных толщин коллектора, В – разрез псевдоакустических импедансов в интервале развития пласта АчБУп; 1 – коэффициенты песчанистости пласта в разрезе скважин; остальные условные обозначения см. на рис. 6

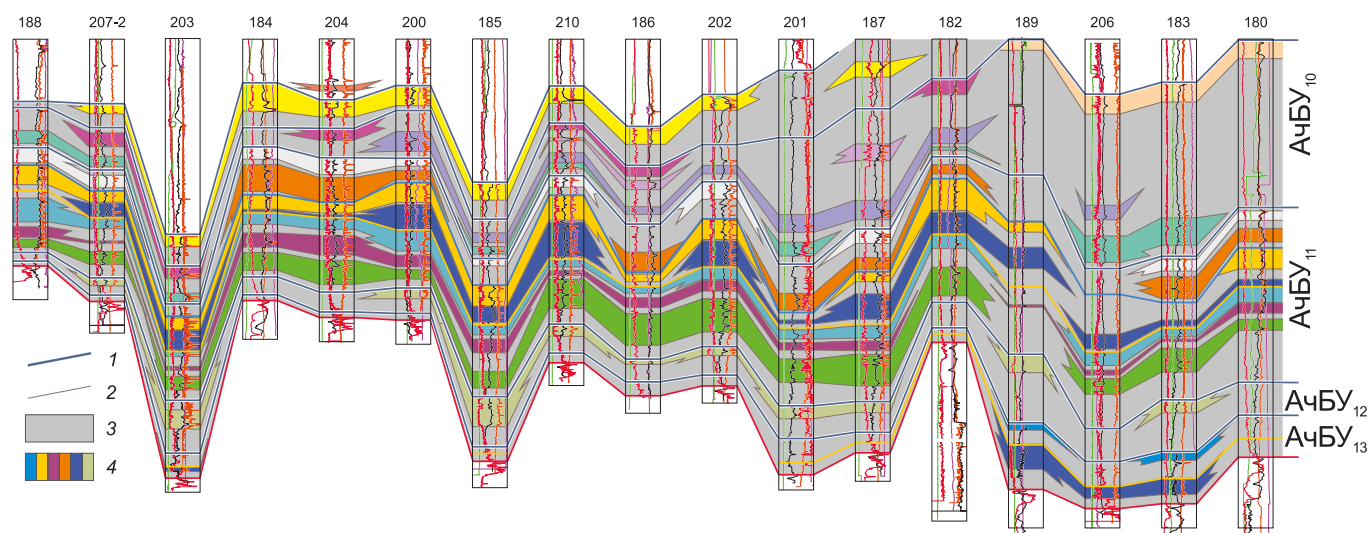


Рис. 8. Распределение элементов конусов выноса в разрезе ачимовской толщи Ямбургского мегавала: границы клиноформных комплексов (1) и песчаных пластов (2); 3 – глубоководные и склоновые преимущественно глинистые отложения; 4 – песчаники разновозрастных конусов выноса

разрезах первых проявлений процессов оползания.

Наиболее масштабно оползневые процессы проявляются в интервалах разреза, представленных переслаиванием тонкозернистых и тонкослоистых алевро-глинистых пород, подстилающих мощные пласты песчаников высокоплотных потоков. Нередко деформационные структуры наблюдаются и в самих песчаниках. Вероятно, основной причиной нарушения стабильности и возникновения оползней в это время могут служить значительные скорости накопления осадков на склоне во время низкого стояния ОУМ, а также волнения и течения, вызывающие

нарушение равновесия осадков в его пределах.

Седиментация песков в прибрежной зоне и глин – в более глубоководной зоне на склоне бассейна – продолжается до тех пор, пока привнос осадков не перестанет компенсировать вновь добавляемое аккомодационное пространство, и не начнется трансгрессия.

Во время фазы низкого стояния ОУМ основная масса песчаного материала откладывается в мелководной зоне на склоне бассейна, где выделяется два депоцентра терригенного осадконакопления: прибрежное мелководье и дельта.

Пространственное распределение осадков различного генезиса в структуре LST, свойственное побережью, где отсутствовали крупные флювиальные системы, иллюстрирует схема фациальной зональности центральной части Ямбургского вала, построенная для секвенции БУ₀⁰ (Жемчугова, Бербенев, 2015). В разрезах верхней части клина низкого стояния она имеет проградационное строение, а последовательность смены осадков в разрезе свидетельствует об их седиментации в условиях нормальной регрессии. Так, к примеру, в разрезах пласта зоны II шельфовые глины сменяются сначала глинистыми алевролитами переходной зоны, а затем и песчаниками нижнего пляжа и верхней предпляжевой зоны (рис. 10).

Моменты частных затоплений, отражающиеся в резкой смене вертикальной последовательности этих фаций, свидетельствуют о мелкомасштабной цикличности изменения ОУМ, но проявляется эта смена всегда на фоне нормальной регрессии.

В случае побережья дельтового типа, распределение основной массы песчаных осадков в пределах как субаэральной, так и субаквальной дельты контролируется флювиальными процессами.

Речные потоки, несущие обломочный материал при впадении в морской бассейн рассеиваются и откладывают осадки в различных зонах: рукавах, протоках, приустьевых валах, формируют мелкие конуса выноса и частично выплескиваются в дельтовые заливы во время паводков. Осадки флювиальных потоков в различных зонах обладают специфическими особенностями и создают парагенетические ассоциации с осадками других генетических типов.



Рис. 9. Положение песчаных линз, сложенных пляжевым комплексом осадков, в зоне преобладающего распространения мелководно-шельфовых глин: 1 – точки скважин с вынесенными значениями коэффициентов песчаности, 2 – границы литолого-фациальных зон, 3 – границы песчаных тел различного генезиса; зоны преобладающего развития отложений: 4 – глубоководной впадины, 5 – склона, 6 – мелководного шельфа; 7 – врезанных долин 8 – песчаников фронтальной части конуса выноса, 9 – песчаники барового (пляжевого) комплекса; 10 – литологическая характеристика пород в разрезах скважин (а): б) – песчаники, в) – песчано-алевро-глинистые породы, г) глинистые отложения; 11 – направление транзита обломочного материала

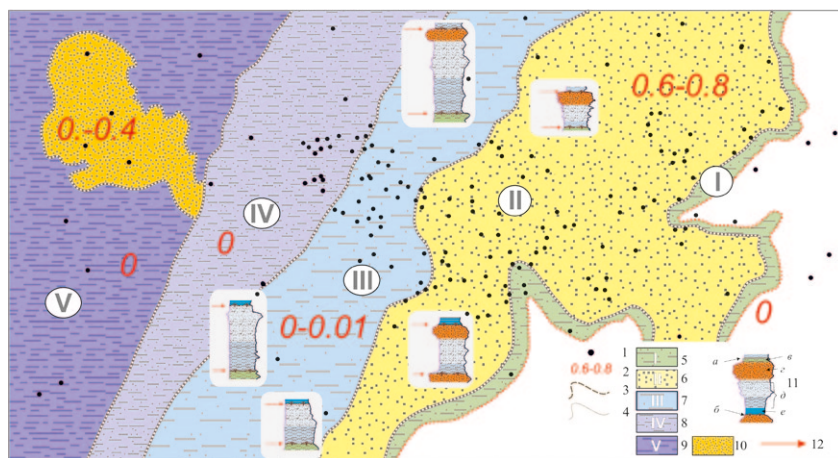


Рис. 10. Схема литолого-фациального районирования центральной части Ямбургского мегавала для пласта БУ₀⁰ (Жемчугова и др., 2008): 1 – положение скважины, 2 – коэффициент песчаности, границы литолого-фациальных зон (3) и подзон (4); зоны преобладающего развития отложений: 5 – забарьерной лагуны, 6 – барового комплекса, 7 – переходной зоны и мелководного шельфа, 8 – склона, 9 – относительно глубоководной впадины, 10 – конуса выноса; 11 – строение эталонных разрезов: а – кровля пласта, б – подошва пласта: отложения: в – забарьерной лагуны, г – нижнего пляжа и верхней предпляжевой зоны, д – нижней предпляжевой и переходной зон, е – мелководного шельфа; 12 – границы секвенции

Флювиальные русла характеризуются однонаправленным течением речной воды с периодическими отклонениями и схожи с руслами в собственно речных системах. Осадочный разрез, сформированный в этой обстановке имеет, преимущественно, грубослоистый характер. Характерно накопление песков мелко- и среднезернистых с ровной, резкой или эрозионной подошвой. Эрозионные процессы при образовании русла сопровождаются накоплением внутрiformационными обломками (интракластами осадочных пород). Русловым песчаникам свойственны следующие типы слоистости: массивная, градационная, волнистая, крупномасштабная косая слоистость, нередко подчеркнутая слойками со значительным количеством углефицированного растительного детрита (УРД). Вверх по разрезу косая слоистость выполаживается и переходит в горизонтальную, причем, количество и мощность слойков с УРД увеличивается. Нередко наблюдается уменьшение гранулометрии вверх по разрезу, что указывает на отмирание русла и его заиливание. В отдельных случаях прорыв нового русла вызывает смятие подстилающих алевро-глинистых слоев. Образование конволютных складок может быть вызвано и последующим оползанием песчаных слоев под действием силы тяжести. Биотурбация незначительна.

Тела русловых песчаников могут быть одно- и многоруковыми. Первые характерны для нижней части субаквальной дельты, вторые – для субазральной обстановки, где положение русел более стабильно. Таким образом, для песчаных пачек, сформированных на этой стадии развития, характерны следующие особенности: а) грубая цикличность, обусловленная колебаниями в поступлении осадков (иногда видны следы заиливания), мелкомасштабным флуктуациями ОУМ или миграцией русла; б) эрозионные врезы, подчеркнутые интракластами осадочных пород; в) крупная косая слоистость, подчеркнутая примесью УРД; г) нередко алевро-глинистые осадки, подстилающие русловые пески сминаются в конседиментационные складки оползания под тяжестью последних.

Осадочный разрез, сформированный в пределах флювиальных русел проток, прирусловых валов, конусов выноса промоин и нередко сменяющий вверх по разрезу грубо ритмичную песчаную пачку, обычно имеет более циклический характер и представлен маломощными слоями (первые сантиметры) алевролитов, тонко-мелкозернистых песчаников с резкой, нередко эрозионной нижней границей, и глин. Слоистость градационная, горизонтальная,

косая, косоволнистая отражает убывание энергии подводного речного потока. Среди осадков прирусловых валов выделяется два типа: преимущественно песчаные сформированные, вероятно, вблизи русла чаще всего с массивной текстурой и глинисто-алевро-песчаные, обычно интенсивно биотурбированные. Наиболее характерная черта осадков – это присутствие биотурбационных текстур: как отдельных, так и многочисленных, вплоть до полной потери первичного текстурного облика. Причем, масштаб биотурбации уменьшается с увеличением глинистости разреза. В междельтовых участках (заливах) в условиях спокойной седиментации идет накопление илов с периодическим выносом песчаного и алевроитового материала по мелким протокам, с большим количеством УРД. Аналогичная картина наблюдается и в краевой части дельты, где русла переходят в протоки.

Песчаные линзы трактов падения и низкого стояния ОУМ в существенно глинистых вмещающих породах хорошо проявляются в атрибутах сейсмической записи, что позволяет выделять их в неопределенных бурением участках. Примером отображения нефтегазоносных объектов в клиноформных комплексах, образовавшихся за счет восточных источников сноса, могут служить результаты интерпретации материалов трехмерных сейсморазведочных работ, выполненных на Медвеьем мегавале. Выделяемые здесь глубоководные и прибрежные песчанники (рис. 11), перекрытые глинистыми осадками, формируют сложнопостроенные ловушки литологического и тектонического экранированного типов (Черепанов и др., 2011).

Образование **трансгрессивного системного тракта** (рис. 1 В) инициируется первым значительным событием затопления (ему отвечает поверхность затопления) после времени максимальной регрессии. По мере затопления шельфа береговая линия отступала, и осадки трансгрессивного системного тракта последовательно перекрывали размытые породы различных трактов. Быстрое повышение уровня воды приводило к заполнению врезанных долин гетеролитными осадками.

В ундоформенных элементах секвенций нижнего мела Западной Сибири трансгрессивные системные тракты либо отсутствуют, либо им отвечают маломощные прослои небольшой пространственной протяженности, практически не диагностируемые в разрезе скважин. Очевидно, подобное строение секвенций было обеспечено интенсивным ростом ОУМ, приводящим к

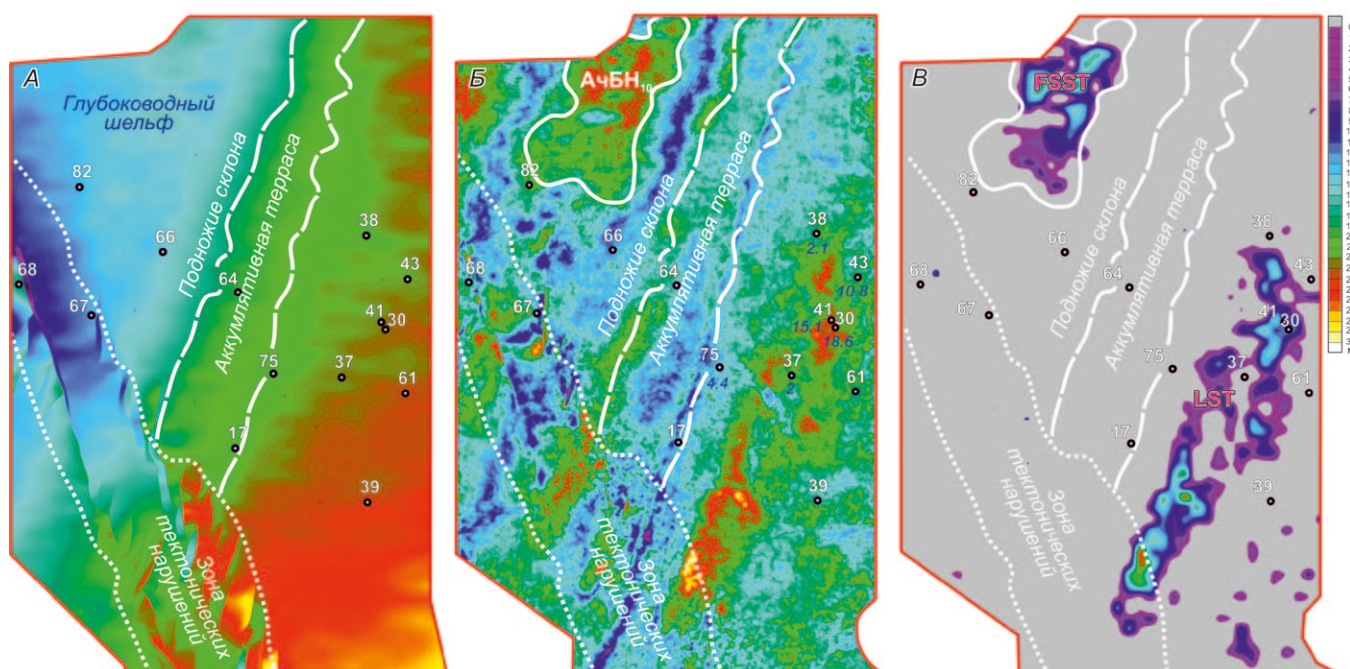


Рис. 11. Отображение элементов секвенции в атрибутах сейсмического волнового поля: А – морфология бассейна; аномалии на картах средних амплитуд (Б) и псевдоакустических импедансов (В), связанные с зонами развития песков в бассейне (FSST) и на склоне (LST); цветоводировочная шкала эффективных толщин, м

стремительному смещению депоцентов седиментации в сторону суши. Однако частные замедления темпов повышения ОУМ на фоне его генерализованного роста могут провоцировать накопление песков прибрежного генезиса, располагающихся в разрезе «фациально неконформно» подстилающим и перекрывающим отложениям (рис. 12). В этом случае, как и с трактом падения ОУМ, песчаники TST будут образовывать разнесенные в пространстве линзы.

В глубоководном бассейне и на его склоне отложения трансгрессивного системного тракта присутствуют всегда, правда, толщины их очень малы, поскольку накапливаются в условиях «седиментационного голода». С этими частями секвенции ассоциируются конденсированные осадки, характеризующиеся очень низкими скоростями осадконакопления. Обычно они представлены 1–2 метровой пачкой черных тонко-, горизонтальнослоистых аргиллитов, сложенные тонкодисперсным равномерно ориентированным глинистым веществом, обогащенным кремнистым и битуминозным материалом (рис. 6).

Формирование **тракта высокого стояния**, или верхнего системного тракта, происходило в фазу замедления темпов роста ОУМ (рис. 1 Г). Особенно контрастно такое замедление проявлялось в прибрежных участках бассейна седиментации, где последовательное сокращение объема приращиваемого аккомодационного пространства в условиях сохраняющейся скорости поступления осадочного материала провоцировало проградацию береговой линии, т.е. вызывало нормальную регрессию. Этот процесс наглядно проявляется в структуре ундоформенной части секвенций, которые здесь представлены одним трактом – верхним. В генерализованном виде последний выглядит следующим образом (рис. 13).

Основание слагают однородные темноокрашенные (до черных) хорошо отмученные аргиллиты с маломощными линзами и слоями алевролитов. Состав и текстурные

особенности осадков отражают в целом спокойные субаквальные обстановки осадконакопления, различаясь лишь по интенсивности поступления терригенного материала, и отвечают наиболее глубоководным для рассматриваемого участка бассейна седиментации шельфовым фациям. Вверх по разрезу их сменяют отложения переходной и нижней предфронтальной зон, которым свойственны преимущественно глинисто-алевритовый состав, серые цвета, отчетливо горизонтальные и линзовиднослоистые текстуры; последние придают породе неявный нодулярный облик; иногда в керне фиксируются следы оползаний осадка и его перемешивания под действием подводных течений. В этой части разреза встречаются многочисленные ихнофаии, большая часть которых относится к *Palaeophycus/Planolites*, *Cylindrichnus*, *Teichichnus*, встречаются также *Terebellina*, *Zoophycos*. Широким развитием пользуются штормовые брекчии (темпеститы).

Вверх по разрезу тракта высокого стояния происходит последовательное уменьшение алевро-пелитовой примеси и увеличение песчаной до перехода алевролитов в песчаники.

Песчаники аркозовые (кварц-полевошпатовые) слоистые с глинисто-карбонатным цементом, средне-мелкозернистые, как правило, неслоистые, нередко с укрупнением размерности песчаного материала вверх по разрезу. Обломочный материал хорошо окатан и отсортирован. В породах присутствуют мелкие ходы илоедов (главным образом это ихнофаия *Skolithos*), но, как правило, они не затушевывают характер седиментационного напластования. Текстурные и структурные особенности песчаников, особенности вертикального и латерального развития позволяют предположить, что они накапливались в пределах нижнего пляжа и верхней предфронтальной зоны.

С трактами высокого стояния в разрезе нижнемеловых отложений Западной Сибири связаны практически повсеместно развитые промысловые пласты группы Б (БУ, БН,

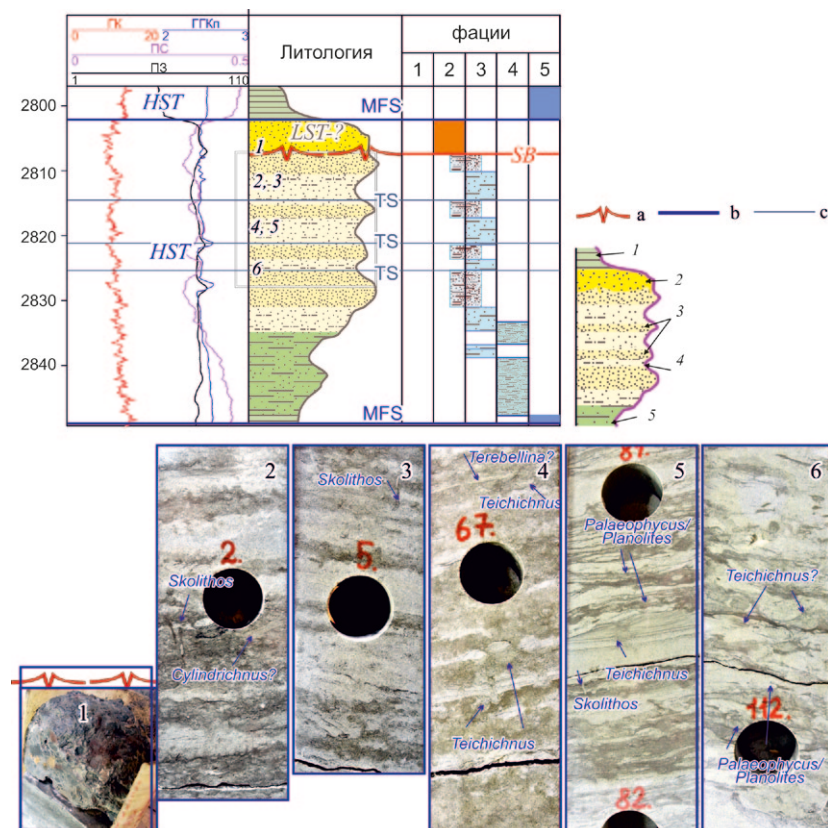


Рис. 12. Выделение маломощного TST в разрезе скважины: фации: 1 – прибрежной зоны, 2 – нижнего пляжа и верхней предпляжевой зоны, 3 – нижней предпляжевой зоны, 4 – переходной зоны, 5 – мелководного шельфа; литологическая характеристика отложений: 1 – мелкозернистые песчаники, 2 – тонкозернистые песчаники и алевролиты, 3 – алевролиты, 4 – переслаивание алевролитов и глин с преобладанием последних; границы: а – секвенции SB (sequence boundary), b – поверхность максимального затопления MFS (maximum flooding surface), c – трансгрессивная поверхность – TS (transgressive surface)

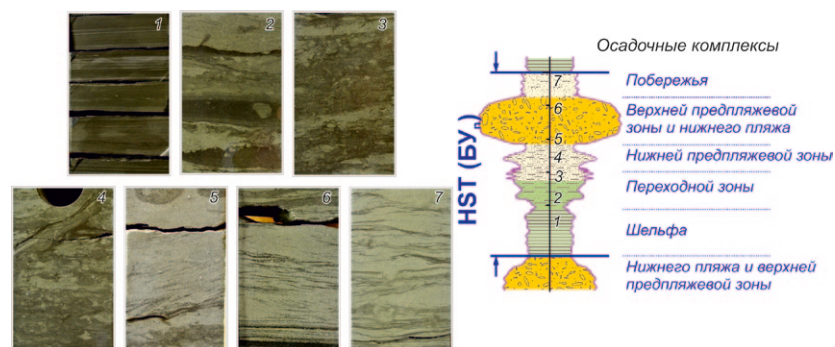


Рис. 13. Распределение фаций в разрезе HST

БС...), закономерности формирования которых создают предпосылки для создания природных резервуаров, способных аккумулировать УВ флюиды и консервировать их скопления.

В зависимости от размеров области мелководной седиментации, а также соотношения объемов приносимого в бассейн осадка и создаваемого аккомодационного пространства, HST в клиноформенной части секвенции может иметь различное строение. В том случае, если нормальная регрессия приводила к смещению береговой линии на склон глубоководной впадины, то на этом склоне накапливались значительные массы обломочного материала, формирующие, как и в случае LST, клинья высокого стояния.

Если же по мере удаления от источника сноса, несмотря на уменьшение приращиваемого аккомодационного пространства, осадка оказывалось недостаточно для компенсации этого прироста, на склоне и в самой впадине верхний системный тракт секвенции представлен маломощными прослоями глин.

Рассмотрим пространственно-временные соотношения формирования элементов секвенций IV-V порядка на примере нижнемеловых отложений Уренгойского мегавала (рис. 14).

Нижняя секвенция S_1 , представленная своей фондоформенной частью, включает нерасчлененные $LST_1 + TST_1 + HST_1$, залегающие непосредственно на кремнисто-битуминозных отложениях баженовского горизонта и имеющие близкую к ним литологическую характеристику, и конус выноса FSST, с кровлей которого отождествляется граница секвенции.

Секвенция S_2 начинается с тракта низкого стояния, характеризующегося очень изменчивыми толщинами и литологией. Во время низкого стояния ОУМ основная масса осадков накапливалась на склоне глубоководной впадины, расположенной восточнее рассматриваемого района, наращивая клинья низкого стояния; но часть материала, сложенного обломками алевроитовой и пелитовой размерности, выносилась в бассейн, перекрывая конусы выноса, как это имеет место в районе скв. 3. На запад толщины LST_2 резко уменьшаются, а в его составе начинают преобладать темно-серые до черных гидрослюдистые аргиллиты, тонкоотмученные, массивные, с включением битуминозного и кремнистого материала. Они слагают маломощную (до 10–15 м) пачку конденсированных отложений, которая в удаленной от склона части впадины объединяет TST_2 и HST_2 .

В районе скв. 4 основной объем секвенции S_2 занимает верхний системный тракт (HST_2), представленный мощной толщей глин. Его образование связано с последовательным смещением побережья на «бровку» глубоководной впадины и выносом в ее пределы больших масс несортированного обломочного, и в первую очередь, глинистого материала.

Сформированный этими отложениями клиноформенный комплекс имеет четкое проградационное строение, хорошо идентифицируемое в волновом сейсмическом поле (рис. 14 С). В разрезе скважин проявление нормальной регрессии отображается закономерной сменой фаций, толщины которых фиксируют обмеление акватории, вызванное уменьшением пространства аккомодации в условиях замедления темпов роста ОУМ.

К TST_2 в этом районе, по-видимому, можно отнести маломощный прослой битуминозных глин, с кровлей которого ассоциируется поверхность максимального затопления (MFS), которая на временных разрезах наиболее выражена, выдержана и отображается как поверхность подошвенного прилегания.

Конус выноса, отвечающий FSST секвенции S_2 , сложен главным образом глинистым и алевритовым материалом. Небольшие толщи песчаников и алевролитов, их преобладающая слоистая текстура, отсутствие в осадках грубообломочной примеси – все это свидетельствует об удаленном положении врезанной долины, «питавшей» этот конус выноса.

Секвенция S_3 присутствует во всех трех элементах: в самой восточной, ундоформенной части (скв. 4) она состоит из одного верхнего системного тракта, сложенного

прибрежным комплексом осадков.

В центральной части (скв. 2 и 3) – секвенция представлена своей клиноформенной частью, объединяющей мощные глинистые толщи LST_3 и HST_3 . В разрезе каждого из них, близких по архитектуре и литологическому наполнению, выделяется несколько самостоятельных клиньев, разделенных аккреционными поверхностями, отражающими проявление цикличности более низкого порядка. Образование этих трактов связано с проявлением нормальной регрессии, что отражается в последовательном «обмелении» слагающих их осадков и преобладании в верхней части прибрежных отложений.

Отложения TST_3 в бассейновых фациях присутствуют только в районе скв. 2. На остальной части этот тракт либо отсутствует, либо объединяется с перекрывающими глинами тракта высокого стояния.

Фондоформенную часть секвенции (скв. 1) слагают глинистые осадки шельфа, которые объединяют все три тракта соответствующей секвенции – LST , TST и HST .

Дистальные части конуса выноса, отвечающего FSST₃ рассматриваемой секвенции, вскрыты в скв. 1 и 2 и сложены ритмично переслаивающимися тонкозернистыми, в различной степени алевритистыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Толщина отдельных прослоев колеблется в пределах от 2–3 мм до 10–15 см. Среди песчаников преобладают тонкозернистые, в различной степени глинистые, разности, с отчетливой косоволнистой, линзовидно-волнистой, горизонтальной слоистостью, иногда нарушенной мелкими текстурами оползания. Некоторые прослои содержат многочисленные мелкие и крупные интракласты глинистых пород.

Архитектура секвенции S_4 во многом повторяет таковую предыдущей секвенции, с той лишь разницей, что на рассматриваемом объекте она представлена в значительной степени своей ундоформенной частью. При этом на самом востоке эти секвенции, выделяемые в объеме лишь трактов высокого стояния, объединяются в единый осадочный комплекс, накопление которого связано с самыми прибрежными участками морского бассейна.

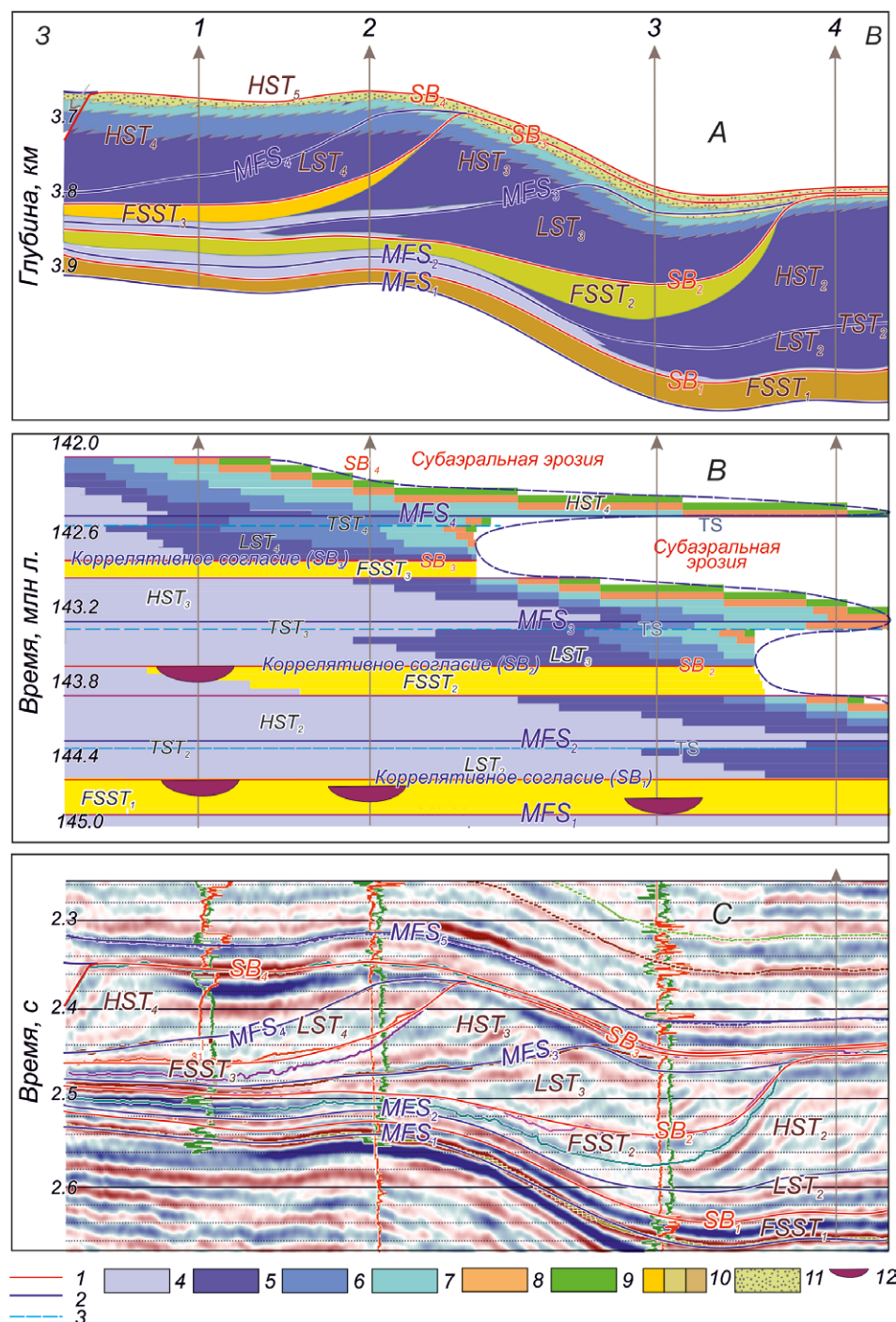
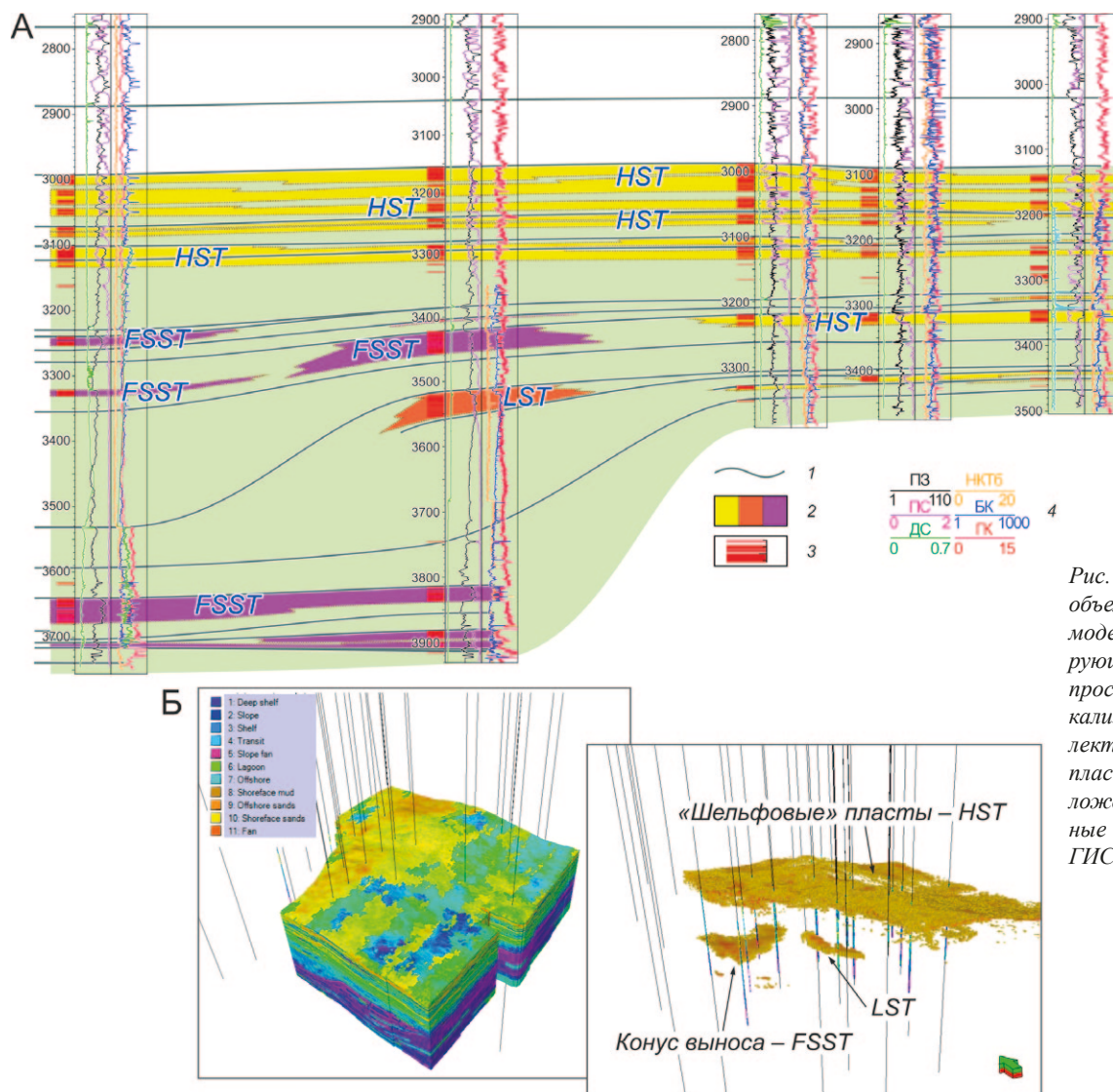
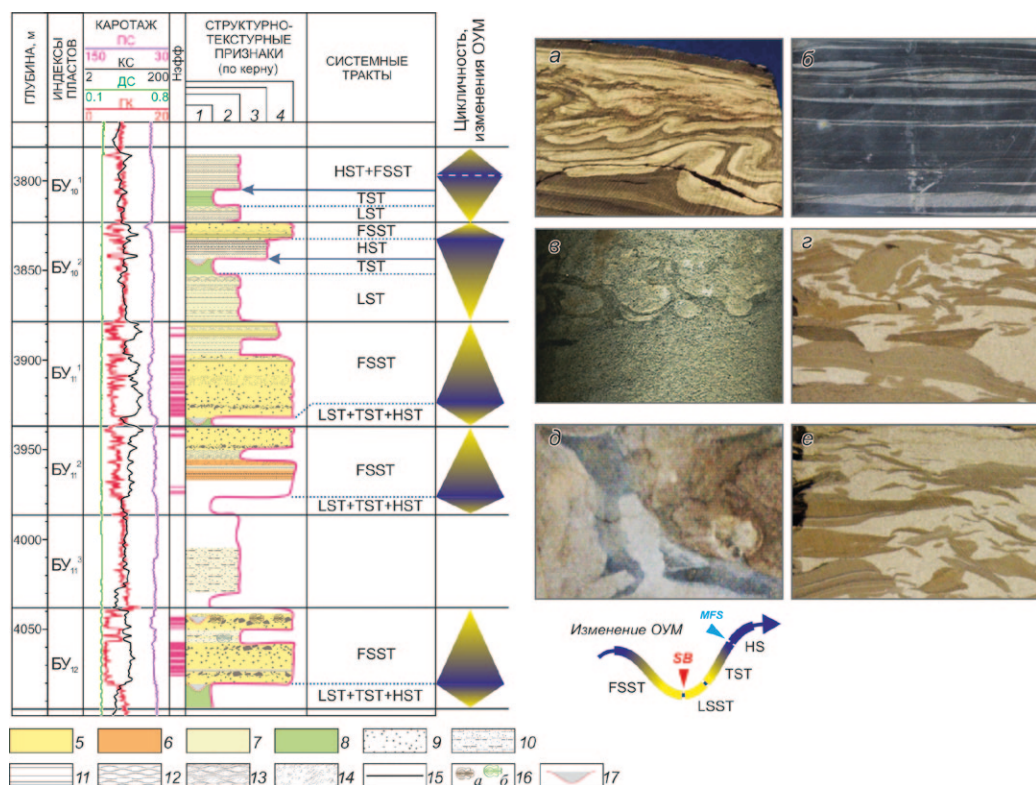


Рис. 14. Временная и глубинная модель секвенций: Границы: 1 – секвенций (SB), поверхностей максимального затопления (MFS) и трансгрессивных поверхностей (TS); фации: 4 – относительно глубоководного бассейна, 5 – склона, 6 – мелководного шельфа, 7 – транзитной (переходной) зоны, 8 – барового (пляжевого) комплекса, 9 – побережья; 10 – разновозрастные конуса выноса FSST, 11 – прибрежные песчаники HST, 12 – предполагаемое время формирования врезов конусов выноса



Здесь секвенции имеют классическое строение: начинаются с наиболее глубоководных фаций в основании, вверх по разрезу осадки последовательно «обмеляются». Это обмеление, вызванное нормальной регрессией, отражает наступление береговой линии, сопровождающееся миграцией песчаного пояса с востока на запад и последовательным замещением песков, накопившихся в условиях берегового склона, алевро-глинистыми осадками прибрежной зоны. При этом толщины монофациальных отложений в разрезах изменяются согласно изменению пространства аккомодации по профилю седиментации.

Детальное изучение керн и целенаправленная седиментологическая интерпретация каротажа позволяет разработать секвенс-стратиграфическую модель изучаемого объекта, в строении которого отражены изменения ОУМ (рис. 15). Результаты такого изучения способствуют выявлению закономерностей распределения потенциальных коллекторов и экранов в разрезе и, соответственно, существенно снижают степень неопределенности создаваемых моделей геологических тел (рис. 16).

Подводя итог, хотелось бы отметить следующее.

Как известно, поиск перспективных объектов, оценка их свойств и прогноз распространения базируется на результатах комплексной интерпретации сейсмических и скважинных данных. Внедрение в эту технологическую цепочку интерпретации данных, полученных путем секвенс-стратиграфического моделирования, позволяет существенно расширить круг задач, решаемых сейсморазведчиками для нефтяной геологии. Интерпретация оптимальным образом скомплексированной геологической и геофизической информации является основой увеличения достоверности прогноза строения и свойств поисковых объектов.

Секвенс-стратиграфические модели уже сами по себе имеют определенную ценность, поскольку позволяют прогнозировать пространственное распределение песчаных коллекторов и глинистых экранов и, соответственно, служить основой для оценки углеводородной продуктивности образованных ими резервуаров. Кроме того, такие модели являются основой построения кубов фаций, необходимых для объемных цифровых моделей, в которых учитываются закономерности трехмерного распределения фильтрационно-емкостных характеристик. Особенно важно решение такой задачи для резервуаров, обладающих сложным распределением коллекторов, так характерных для нижнемеловых отложений.

Несомненным достоинством секвенс-стратиграфического анализа является и то, что в рамках такого анализа используются общеизвестные («неэксклюзивные») методы исследования природных объектов и широко применяемые комплексы обработки и интерпретации скважинных и сейсмических данных.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность организациям, предоставившим возможность публикации материалов, касающихся примеров работ на реальных геологических объектах.

Литература

- Жемчугова В.А., Бербенев М.О. (2015). Основные принципы моделирования структуры природных резервуаров (на примере меловых отложений Западной Сибири). *Георесурсы*, 2(61), с. 54–62. <https://doi.org/10.18599/grs.61.2.5>
- Жемчугова В.А., Жуков А.П., Эпов К.А. и др. (2007). Применение технологии моделирования структуры природных резервуаров для неокомских отложений Ямбургского месторождения. *Доклады XII координационного геологического совещания ОАО Газпром*, с. 43–58.
- Жуков А.П., Жемчугова В.А., Эпов К.А. и др. (2006). Прогнозирование структуры и свойств природных резервуаров на основе комплексной интерпретации сейсмических и скважинных геолого-геофизических данных. *Технологии сейсморазведки*, 1, с. 69–78.
- Карагодин Ю.Н., Казаненков В.А., Рыльков С.А. и др. (2000). Северное Приобье Западной Сибири. Геология и нефтегазоносность неокма (системно-литологический подход). Новосибирск: Изд-во СО РАН.
- Нежданов А.А., Пономарев В.А. и др. (2000). Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири. М.: Академия горных наук.
- Нефтегазоносные провинции СССР (справочник) (1983). Под ред. Г.Х. Дикенштейна, С.П. Максимова, В.В. Семеновича. М.: Недра.
- Сейсмическая стратиграфия (1982). Под ред. Ч. Пейтона. М.: Мир.
- Черепанов В.В., Парасына В.С., Жуков А.П. и др. (2011). Новые данные о геологическом строении и перспективах углеводородной продуктивности нижнего мела Медвежьего мегавала. *Технологии сейсморазведки*, 2, с. 49–58.
- Bouma A. (1962). *Sedimentology of some flish deposits*. Amsterdam. Elsevier, 168 p.
- Jervy M.T. (1988). Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In *Sea Level Changes – An Integrated Approach* (C.K. Wilgus, B.S. Hastings, C. G. St.C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross and J. C. VanWagoner, Eds.), pp. 47–69. SEPM Special Publication 42. <https://doi.org/10.2110/pec.88.01.0047>
- Mitchum R.M. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 1: Glossary of terms used in seismic stratigraphy. Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, Oklahoma: AAPG. Memoir 26, pp. 205–212.
- Posamentier H.W., Allen G.P. (1993). Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors. *Sedimentary Geology*, 86(1–2). [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90135-R](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90135-R)

Сведения об авторах

Валентина Алексеевна Жемчугова – доктор геол.-мин. наук, профессор кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1

e-mail: zem@gds.ru

Вадим Викторович Рыбальченко – кандидат геол.-мин. наук, начальник Управления

ПАО Газпром

Россия, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 156, лит. А

Татьяна Анатольевна Шарданова – кандидат геол.-мин. наук, доцент кафедры нефтяной седиментологии

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1

Статья поступила в редакцию 11.03.2021;

Принята к публикации 19.04.2021;

Опубликована 25.05.2021

Sequence-stratigraphic model of the West Siberia Lower Cretaceous

V.A. Zhemchugova^{1*}, V.V. Rybalchenko², T.A. Shardanova¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²Gazprom PJSC, St. Petersburg, Russian Federation

*Corresponding author: Valentina A. Zhemchugova, e-mail: zem@gds.ru

Abstract. Apparently, conceptual base of the sequence stratigraphy is one of the most acknowledged methodologies in the geological world at the present time for the sedimentary strata structure prediction. It is based on the complex analysis of the seismic, stratigraphic and sedimentary data on the depositional bodies where the structure and facies filling is regulated by the relative sea level changes. The Lower Cretaceous section of the Western Siberia in this regard is the unique object, as it is represented by the full range of the clastic depositional environments – from relatively deep-water to the continental, which are very sensitive to the conditions changes. Sequence-stratigraphic analysis results can be used to complete the pragmatic tasks in the petroleum geology as the analysis is based on the reconstruction of the sedimentogenesis processes in the past, and the understanding of that processes is the key to the generalized depositional model development. This model can be used to create the models, which can be applied to the unique local objects that occur in the Lower Cretaceous section.

Key words: West Siberia region, sequence-stratigraphic model, sequences, system tracts, facies, natural reservoirs

Recommended citation: Zhemchugova V.A., Rybalchenko V.V., Shardanova T.A. (2021). Sequence-stratigraphic model of the West Siberia Lower Cretaceous. *Georesursy = Georesources*, 23(2), pp. 179–191. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.18>

Acknowledgments

The authors express their deep gratitude to the organizations that made it possible to publish materials concerning examples of work at real geological sites.

References

- Bouma A. (1962). *Sedimentology of some flish deposits*. Amsterdam. Elsevier, 168 p.
- Cherepanov V.V., Parasyna V.S., Zhukov A.P. et al. (2011). Prospects for hydrocarbon accumulations in the lower cretaceous sediments of Medvejya megaswell. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2, pp. 49–58. (In Russ.)
- Jervy M.T. (1988). Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In *Sea Level Changes – An Integrated Approach* (C.K. Wilgus, B.S. Hastings, C. G. St.C. Kendall, H. W. Posamentier, C. A. Ross and J. C. VanWagoner, Eds.), pp. 47–69. SEPM Special Publication 42. <https://doi.org/10.2110/pec.88.01.0047>

Karogodin Yu.N., Kazanekov V.A., Rylkov S.A., Ershov S.V. (2000). Northern Ob in Western Siberia. *Geology and petroleum potential of the Neocomian (system-litological approach)*. Novosibirsk: SO RAS. (In Russ.)

Mitchum R.M. (1977). *Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 1: Glossary of terms used in seismic stratigraphy. Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, Oklahoma: AAPG. Memoir 26, pp. 205–212.

Oil-and-gas-bearing provinces of the USSR (reference book) (1983). Edited by G.Kh. Dikenstein, S.P. Maksimov, V.V. Semenovich. Moscow: Nedra. (In Russ.)

Nezhdanov A.A., Ponomarev V.A. et al. (2000). *Geology and Petroleum of the Western Siberia Achimov strata*. Moscow: Academy of Mining Sciences. (In Russ.)

Posamentier H.W., Allen G.P. (1993). Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors. *Sedimentary Geology*, 86(1–2). [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90135-R](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90135-R)

Seismic stratigraphy (1982). Ed. Ch. Peiton. Moscow: Mir. (In Russ.)

Zhemchugova V.A., Berbenev M.O. (2015). Basic principles for modeling reservoir structure (on the example of Cretaceous deposits of the Western Siberia). *Georesursy = Georesources*, 2(61), pp. 54–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.61.2.5>

Zhemchugova V.A., Zhukov A.P., Epov K.A. et al. (2007). Application of natural reservoir structure modeling technology to Neocomian deposits of the Yamburg field. XII Geological Meeting of JSC Gazprom, pp. 43–58. (In Russ.)

Zhukov A.P., Zhemchugova V.A., Epov K.A. et al. (2006). Prediction of the structure and properties of natural reservoirs on the basis of integrated interpretation of seismic and borehole geological and geophysical data. *Technologii Seysmorazvedki*, 1, pp. 69–78. (In Russ.)

About the Authors

Valentina A. Zhemchugova – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Head of the Petroleum Geology Department
Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation
e-mail: zem@gds.ru

Vadim V. Rybalchenko – PhD (Geology and Mineralogy), Head of Department
Gazprom PJSC
156, lit. A, Moskovsky ave., St.Petersburg, 196105, Russian Federation

Tatiana A. Shardanova – PhD (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Oil Sedimentology
Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Manuscript received 11 March 2021;

Accepted 19 April 2021;

Published 25 May 2021