

УДК 551.86

DOI 10.47148/0016-7894-2024-6-45-56

Гиперпикнальные турбидиты как основной тип песчаных отложений ачимовской толщи Западной Сибири

© 2024 г. | А.В. Храмова¹, К.В. Зверев², А.В. Мельников¹¹ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия; avkhramtsova@rosneft.ru, avmelnikov2@tnnc.rosneft.ru;²ООО «Газпромнефть научно-технический центр», Красноярск, Россия; Zverev.KV@gazpromneft-ntc.ru

Поступила 17.06.2024 г.

Доработана 06.08.2024 г.

Принята к печати 25.09.2024 г.

Ключевые слова: экстрабассейновые турбидиты; гиперпикнальные потоки; растительный детрит; ачимовская толща; глубоководные каналы; глубоководные конусы выноса.

Аннотация: Особенности строения пород ачимовской толщи, изученных по керну скважин и результатам 3D-сейсморазведки, свидетельствуют о том, что большая их часть была сформирована гиперпикнальными (экстрабассейновыми) турбидитовыми потоками, а не классическими (интрабассейновыми) турбидитовыми течениями. Практически все песчаные и алевропесчаные породы являются отложениями экстрабассейновых турбидитов, возникновение которых было связано непосредственно с разгрузкой речных паводковых вод в морской бассейн. На гиперпикнальный генезис турбидитов указывают следующие признаки: наличие растительного детрита и крупных обломков древесины; отсутствие полной классической последовательности цикла Боума; переходы русловых систем на бровке шельфа в склоновые каналы, наблюдаемые на седиментационных срезах, построенных по результатам 3D-сейсморазведки. В отличие от классических турбидитовых потоков, гиперпикнальные турбидитовые течения могли существовать достаточно продолжительное время — нескольких суток или недель (в течение всего периода развития речного паводка на суше), транспортируя большие объемы речных осадков в глубоководный бассейн. Таким образом, форма и размеры подводных конусов выноса ачимовской толщи, сформированных гиперпикнальными турбидитовыми течениями, определялись длительностью речных паводков, а также объемом водной разгрузки и осадочной нагрузки реки на суше. Более длительные периоды речных паводков и более крупный размер рек приводили к образованию более крупных подводных конусов выноса, и наоборот.

Для цитирования: Храмова А.В., Зверев К.В., Мельников А.В. Гиперпикнальные турбидиты как основной тип песчаных отложений ачимовской толщи Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2024. – № 6. – С. 45–56. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-6-45-56.

Hyperpycnal turbidites: main type of Lower Cretaceous Achimov sandy deposits in Western Siberia

© 2024 | A.V. Khramtsova¹, K.V. Zverev², A.V. Melnikov¹¹LLC "Tyumen Petroleum Research Center", Tyumen, Russia; avkhramtsova@rosneft.ru, avmelnikov2@tnnc.rosneft.ru;²LLC "Gazpromneft scientific and technical center", Tyumen, Russia; Zverev.KV@gazpromneft-ntc.ru

Received 17.06.2024

Revised 06.08.2024

Accepted for publication 25.09.2024

Key words: extrabasinal turbidites; hyperpycnal flows; plant detritus; Achimov Formation; deep-water channels; deep-sea fans.

Abstract: Structural features of the Achimov rocks studied from well cores and 3D seismic survey results, are indicative of the fact that most of them were formed by hyperpycnal (extrabasinal) rather than classical (intrabasinal) turbidite flows. Almost all sandy and silt-sandy rocks are deposits of extra-basin turbidites the formation of which was directly related to river floodwater discharge into the sea basin. The following signs point to hyperpycnal genesis of turbidites: presence on plant detritus and wood fragments; absence of the complete classical Bouma cycle sequence; transitions of the shelf edge riverbed systems into slope channels observed in depositional slices obtained from 3D seismic data. In contrast to those classical, hyperpycnal turbidite flows could exist for quite a long time: several days or weeks (during the entire period of onshore river flooding), transporting large volumes of fluvial sediments into the deep-water basin. The shape and size of the Achimov submarine fans formed by hyperpycnal turbidite flows were thus determined by the duration of river floods, as well as water discharge volume and onshore river sediment load. Longer periods of river floods and larger river sizes resulted in formation of larger submarine fans, and vice versa.

For citation: Khramtsova A.V., Zverev K.V., Melnikov A.V. Hyperpycnal turbidites as the main type of sandy deposits of the Achimov formation of Western Siberia. *Geologiya nefi i gaza*. 2024;(6):45–56. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-6-45-56. In Russ.

Введение

Ачимовская пачка впервые была выделена Ф.Г. Гурари в 1959 г. в Обь-Иртышском междуречье Западной Сибири и переведена в ранг толщи в 1964 г. И.И. Нестеровым и Ю.В. Брадучаном [1]. Ачимовская толща рязанско-ранневаланжинского возраста залегает в основании нижнемелового клиноформного комплекса [2] и традиционно является перспективным объектом для поиска ловушек неструктурного типа и наращивания ресурсного потенциала УВ.

Строению и условиям формирования клиноформного нижнемелового комплекса Западной Сибири посвящены многочисленные работы Ф.В. Гурари [1], В.В. Шиманского и др. [3], А.Э. Конторовича и др. [4], В.П. Алексеева [5]. Большинство исследователей считает, что ачимовские отложения формировались в глубоководно-морском бассейне за счет турбидитовых течений, связанных с обрушениями верхней части подводного склона и бровки шельфа или прямого дельтового питания. Тем не менее комплексирование результатов детальных седиментологических исследований ядра и данных 3D-сейсморазведки свидетельствует о гиперпикнальном генезисе турбидитовых отложений ачимовской толщи. Гиперпикнальные потоки возникают, когда плотность втекающих в приемный бассейн речных вод выше плотности вод самого приемного бассейна. Гиперпикниты (гиперпикнальные турбидиты) — продукты гиперпикнальных потоков, особый тип турбидитов с характерным набором признаков (таблица), которые отличают их от классических (интрабассейновых) турбидитов.

Фактический материал и методы исследований

Изучение осадочных процессов, механизмов транспортировки и перераспределения осадков в бассейне седиментации при формировании ачимовской толщи Западной Сибири проводилось на ядерном материале (более 3 тыс. пог. м) с привязкой к геофизическим исследованиям скважин (ГИС) и результатам сейсморазведки 3D (карты атрибута Variance, среднеквадратичных амплитуд (RMS), спектральной декомпозиции, временных толщин).

При седиментологическом описании отложений ачимовской толщи литотипы выделялись по структурному и текстурному признакам без привязки к какой-либо из существующих идеализированных текстурных последовательностей (Лови, Боума и Стоу [6]). Это связано с тем, что изученные ачимовские отложения не относятся по генезису к классическим турбидитам, строение которых отражает изменение гидродинамических свойств в условиях постепенно замедляющегося турбулентного гравитационного осадочного потока. Гиперпикнальные турбидитовые потоки существуют более продолжительное время и характеризуются неоднократными изменениями скорости течения, что приводит к формированию осадков, строение которых не соответствует в полной мере идеали-

зированным текстурным последовательностям, выделенным для классических турбидитов. Кроме того, при изучении турбидитовых отложений ачимовской толщи были выявлены слои гибридных потоков [7], а также признаки переработки турбидитовых осадков контурными течениями и внутренними приливами [8, 9], строение которых также не укладывается в текстурные схемы классических турбидитов.

Основные результаты седиментологического анализа ядра

В результате детального седиментологического анализа ядра, отобранного из отложений ачимовской толщи, были выявлены признаки, указывающие на их формирование гиперпикнальными турбидитовыми потоками:

- наличие большого количества углефицированного растительного детрита и крупных обломков углефицированной древесины в песчаниках и алевролитах, что не характерно (не может транспортироваться на значительные расстояния и накапливаться в пределах подводных конусов выноса) для классических турбидитов;
- присутствие трещин синерезиса, свидетельствующих о периодическом распреснении глубоководных осадков, вызванное привнесением пресной воды гиперпикнальными турбидитовыми потоками;
- наличие в песчаниках и алевроглинистых породах аутигенного сидерита (развитие слабостановительных условий в осадке за счет истощения кислорода, вследствие окисления растительной органики, привнесенной вместе с осадками гиперпикнальным потоком);
- отсутствие в песчаниках классической текстурной последовательности Боума, выделенной для классических турбидитов.

На ведущую роль гиперпикнальных течений в транспортировке терригенных осадков с суши на глубоководный склон и его подножие при формировании отложений ачимовской толщи указывает повсеместное присутствие в отложениях углефицированных растительных остатков (рис. 1, 2): растительного детрита, крупных обломков древесины, а также стеблей наземных растений.

В отложениях ачимовской толщи растительный детрит и обломки углефицированной древесины отмечаются повсеместно во всех изученных ядерных интервалах (см. рис. 1).

Углефицированный растительный материал обычно представлен в песчаниках и алевроглинистых породах тонкими (от 1 до 50 мм толщиной) углистыми слойками и линзочками (см. рис. 2) либо рассеян в массе породы, подчеркивая ее градационное строение (см. рис. 2 D).

Сохранение в гиперпикнальном турбидитовом потоке основной массы транспортируемого им растительного детрита и растительных остатков (листьев и обломков древесины) на всем пути его

Таблица. Диагностические признаки классических и гиперпикнальных турбидитов ачимовской толщи Западной Сибири
Table. Diagnostic criteries for the recognition of Intrabasinal and Extrabasinal turbidites of the West Siberian Achimov Formation

Породы	Классические турбидиты мелко-среднезернистые и тонкозернистые	Гиперпикниты (гиперпикнальные турбидиты)
Структура	Песчаники от средне-мелкозернистых до алевролитов	Песчаники от средне-мелкозернистых до алевролитов
Текстура	Массивная, конволютная, флюидальная, градационная (Ta), горизонтальная (Tb), восходящая рябь течений (Tc)	Массивная, мелкая косая, восходящая рябь течений, горизонтальная
Включения	Глинистые интракласты	Глинистые интракласты
Ихнофоссилии и интенсивность биотурбации	<i>Chondrites (Ch)</i> , <i>Phycosiphon (Ph)</i> , редко <i>Ophiomorpha rudis (Or)</i> . BI = 0–3	<i>Chondrites (Ch)</i> , <i>Phycosiphon (Ph)</i> . BI = 0–2
Фауна и флора	Редко аммониты, двустворки <i>Vuchia</i> и иноцерамы	Обломки древесины, углистые линзочки и слойки, углистый детрит, углефицированные остатки стеблей и листьев наземных растений
Контакты и переходы	Градационный и эрозионный, градация прямая	Эрозионный до резкого, градация прямая до обратной
Реология и режим течения	Турбулентный поток, верхний и нижний режимы течения	Турбулентный поток, верхний и нижний режимы течения
Поведение потока	Кратковременный однонаправленный убывающий (снижение скорости потока во времени)	Долговременный однонаправленный с неустойчивым скоростным режимом (колебания скорости во времени)
Время существования	Часы	Дни до нескольких недель
Источник питания	Обрушение подводного склона и бровки шельфа	Паводковые речные воды
Ссылка на некоторые литературные источники	Bouma, 1962; Stow, 1980, 1992; Dykstra, 2012	Zavala, 2011, 2012, 2016, 2020; Dykstra, 2012; Mulder et al., 2002

движения осуществляется за счет процесса даунвеллинга (downwelling), т. е. погружения вытекающего из устья реки пресного речного потока, обогащенного алевроглинистым и тонкопесчаным материалом, под менее плотную массу морской воды и последующего его движения по морскому дну в сторону бассейна [10]. Процесс даунвеллинга не развивается в классическом турбидитовом потоке из-за отсутствия разницы плотности воды в потоке и окружающей его морской среде (рис. 3).

В результате процесса даунвеллинга окружающая морская вода в пристеночном слое гиперпикнального потока («пристеночный слой» — гидродинамический термин, обозначающий границу потока с дном или окружающей его массой вещества другой плотности) увлекается с ним вниз по склону, не приводя к смешиванию пресной воды самого потока с вмещающей его морской водой (за счет небольшой разницы скоростей гиперпикнального потока и увлекаемой им морской воды в пристеночном слое). Этому способствует также и низкая скорость головной части гиперпикнального турбидитового потока.

Таким образом, отсутствие или очень слабое перемешивание опресненного гиперпикнального потока с вмещающей морской водой препятствует

выносу из него растительных остатков в процессе движения.

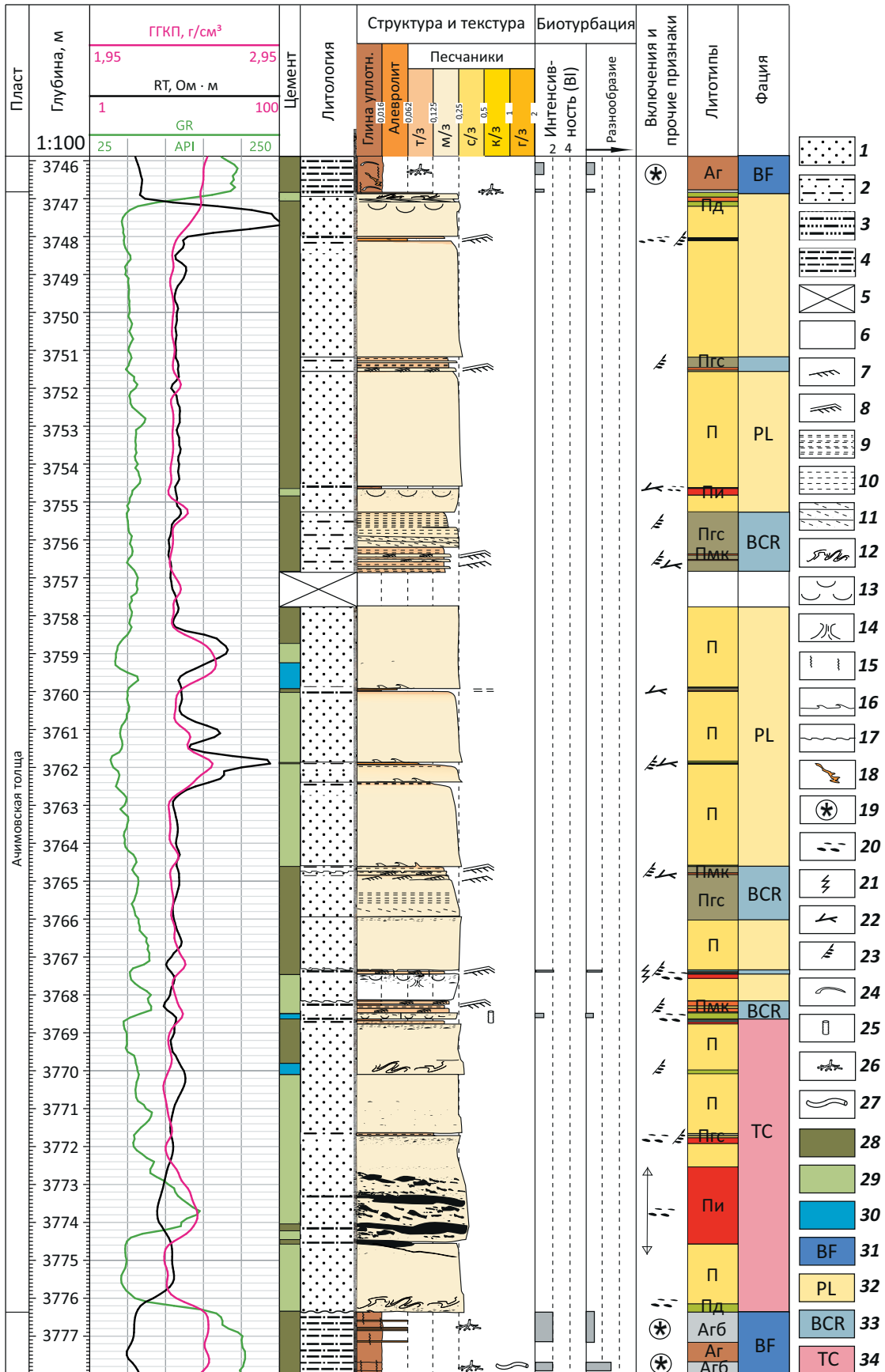
Имеющиеся в настоящее время теоретические представления о процессах транспортировки осадков гиперпикнальными (экстрабассейновыми) турбидитовыми потоками и классическими (интрабассейновыми) турбидитовыми течениями указывают на невозможность переноса углистого детрита классическими турбидитовыми течениями на большие расстояния [11]. Это свидетельствует в пользу гиперпикнального генезиса ачимовских песчаников, обогащенных углистым материалом.

Кроме того, в последние десятилетия накопился обширный научный материал, подтверждающий связь образования турбидитов с прямой разгрузкой осадка в бассейн речными паводковыми водами в виде гиперпикнальных потоков [12–19].

Хорошим примером существования отложений гиперпикнальных турбидитовых потоков на значительном удалении от береговой линии является подводный конус выноса р. Конго (Заирский конус выноса). В современных отложениях этого подводного конуса выноса на глубине 3862 м и удалении 441 км от береговой линии были обнаружены турбидитовые осадки, обогащенные листьями и обломками древесины [20]. Нахождение раститель-



Рис. 1. Седиментологическая колонка ачимовской толщи севера Западной Сибири
 Fig. 1. Sedimentological log of the Achimov series, the West Siberian north



Усл. обозначения к рис. 1

Legend for Fig. 1

Литология (1–5): 1 — песчаники, 2 — песчаники алевритовые, 3 — алевролиты крупнозернистые, 4 — алевролиты мелкозернистые глинистые, аргиллиты, 5 — керн не отобран; **текстуры (6–18):** 6 — массивная, 7 — рябь течений, 8 — сдвоенные слойки в мелкокосослоистых сериях, 9 — сдвоенные слойки в субгоризонтальной слоистости, 10 — субгоризонтальная слоистость, 11 — косяя слоистость, 12 — конволютная, 13 — блюдцеобразная, 14 — трубки обезвоживания, 15 — биотурбационная, 16 — пламенная, 17 — знаки нагрузки на контакте слоев, 18 — инъекционная; **включения (19–24):** 19 — пирит, 20 — глинистые интракласты, 21 — трещины синерезиса, 22 — обломки древесины, 23 — растительный детрит, 24 — раковинный детрит; **ихнофоссилии (25–27):** 25 — *Ophiomorpha rudis*, 26 — *Chondrites*, 27 — *Helminthopsis*; **состав цемента (28–30):** 28 — глинистый, 29 — карбонатно-глинистый, 30 — карбонатный; **фации (31–34):** 31 — дно бассейна, 32 — проксимальной части лопасти, 33 — отложений, переработанных донными течениями, 34 — турбидитового канала

Lithology (1–5): 1 — sandstone, 2 — silty sandstone, 3 — coarse-grained siltstone, 4 — fine-grained clayey siltstone, claystone, 5 — no recovery; **textures (6–18):** 6 — massive, 7 — current ripples, 8 — ripple with mud drapes, 9 — mud-draped in subhorizontal bedding, 10 — parallel lamination, 11 — cross-bedding, 12 — convolute lamination, 13 — dish structures, 14 — water-escape pipes, 15 — bioturbation, 16 — flame structure, 17 — load casts, 18 — injection; **inclusions (19–24):** 19 — pyrite, 20 — clay clasts, 21 — syneresis cracks, 22 — wood fragments, 23 — plant detritus, 24 — shell detritus; **trace fossils (25–27):** 25 — *Ophiomorpha rudis*, 26 — *Chondrites*, 27 — *Helminthopsis*; **cement composition (28–30):** 28 — clay, 29 — clayey-carbonate, 30 — carbonate; **facies (31–34):** 31 — basin floor, 32 — proximal lobes, 33 — deposits reworked by bottom currents, 34 — turbidite channel

ных остатков отмечается также на дне Японского моря на глубине 3382 м в современных осадках, которые были сформированы гиперпикнальными потоками, перемещавшимися от береговой линии вглубь бассейна на расстояние 700 км [21].

Следует также отметить, что углистые слойки могут быть локальным источником УВ для турбидитовых отложений. Одним из примеров с доказанным локальным нефтегенерационным потенциалом углистого материала турбидитовых песчаников служат миоценовые отложения бассейна Кутей в Индонезии [22]. Таким образом, наличие значительного количества углистого материала в песчаниках и алевролитах ачимовской толщи, сформированных гиперпикнальными турбидитовыми течениями, позволяет рассматривать их как участки, возможно обладающие собственным генерационным потенциалом.

Источники питания и механизмы движения классических и гиперпикнальных турбидитов

Классические (интрабассейновые) и гиперпикнальные (экстрабассейновые) турбидитовые потоки полностью или частично отличаются друг от друга источником материала (см. таблицу, рис. 3 А), механизмом движения, особенностями транспортировки потоком осадочного материала, структурой турбидитового потока в процессе движения, составом транспортируемого материала, а также процессами седиментации, наличием углефицированных остатков, морфологией конусов выноса.

Источником материала для классических (интрабассейновых) турбидитов являются осадки, расположенные на подводном склоне, внутри самого морского бассейна (см. рис. 3 А). Питание гиперпикнальных турбидитовых потоков осуществляется за счет разгрузки осадка речным потоком в периоды паводков. В такие периоды речной поток максимально нагружен осадком, что позволяет речному потоку, вытекающему из устья реки в бассейн, до-

стичь необходимой плотности ($> 1036\text{--}1043 \text{ кг/м}^3$) для образования придонного гиперпикнального потока, текущего по поверхности морского дна в сторону бассейна [23].

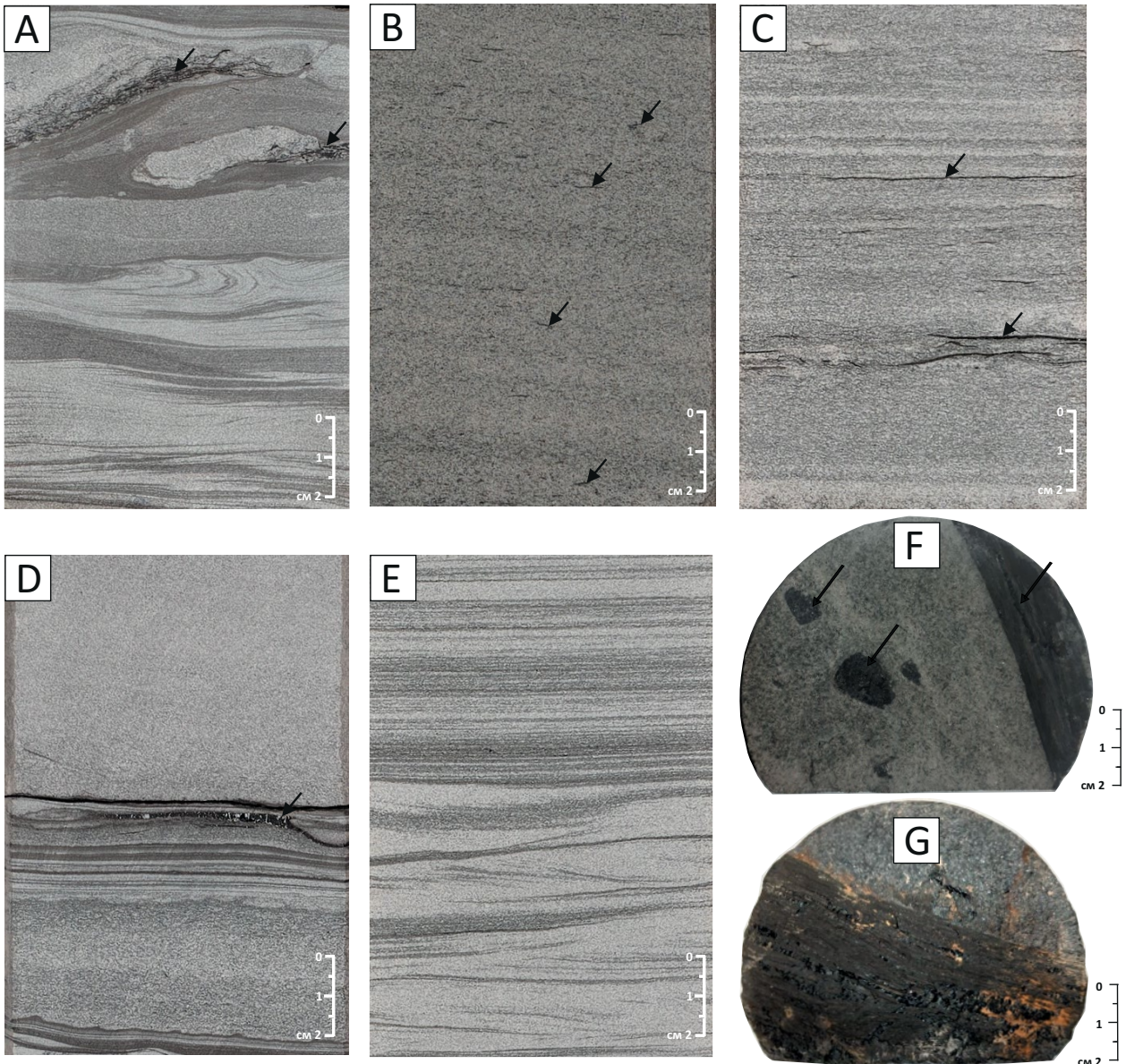
В классическом турбидитовом потоке, в отличие от гиперпикнального турбидитового потока, движение происходит исключительно на подводном склоне и осуществляется только за счет воздействия силы гравитации на взвешенные осадочные частицы (см. рис. 3 В). Действующая на взвешенные осадочные частицы гравитационная составляющая, параллельная склону, придает им импульс движения вниз по склону, трансформируя потенциальную энергию осадочных частиц в кинетическую. Вызванное гравитацией движение взвешенных осадочных частиц вниз по склону, в свою очередь, увлекает за собой и окружающую их водную массу (в гиперпикнальных потоках наоборот — вытекающая из устья реки вода приводит в движение транспортируемые ею осадки), происходит так называемое зажигание турбидитового потока и его дальнейшее движение по склону за счет автосуспензирования.

В быстродвигающейся голове потока формируется высокоплотный придонный инерционный (зерновой) слой. Верхняя низкоплотная часть потока, обогащенная тонкозернистой взвесью, движется медленнее головы потока.

В процессе гравитационного перемещения осадочной массы вниз по склону происходит ее постепенное обводнение окружающей морской водой, сопровождающееся неоднократными трансформациями потока, связанными с изменениями его реологических свойств, концентрации и плотности (вниз по склону связанный дебрисный поток переходит в гиперконцентрированный осадочный поток, далее в сверхкритический концентрированный ламинарный осадочный поток, субкритический высокоплотный турбидитовый поток и низкоплотный турбидитовый поток). Движение классического турбидитового потока вниз по склону происходит



Рис. 2. Углефицированные растительные остатки в ядре глубоководных конусов выноса ачимовской толщи Западной Сибири
Fig. 2. Plant remains in the core of the Achimov submarine fans

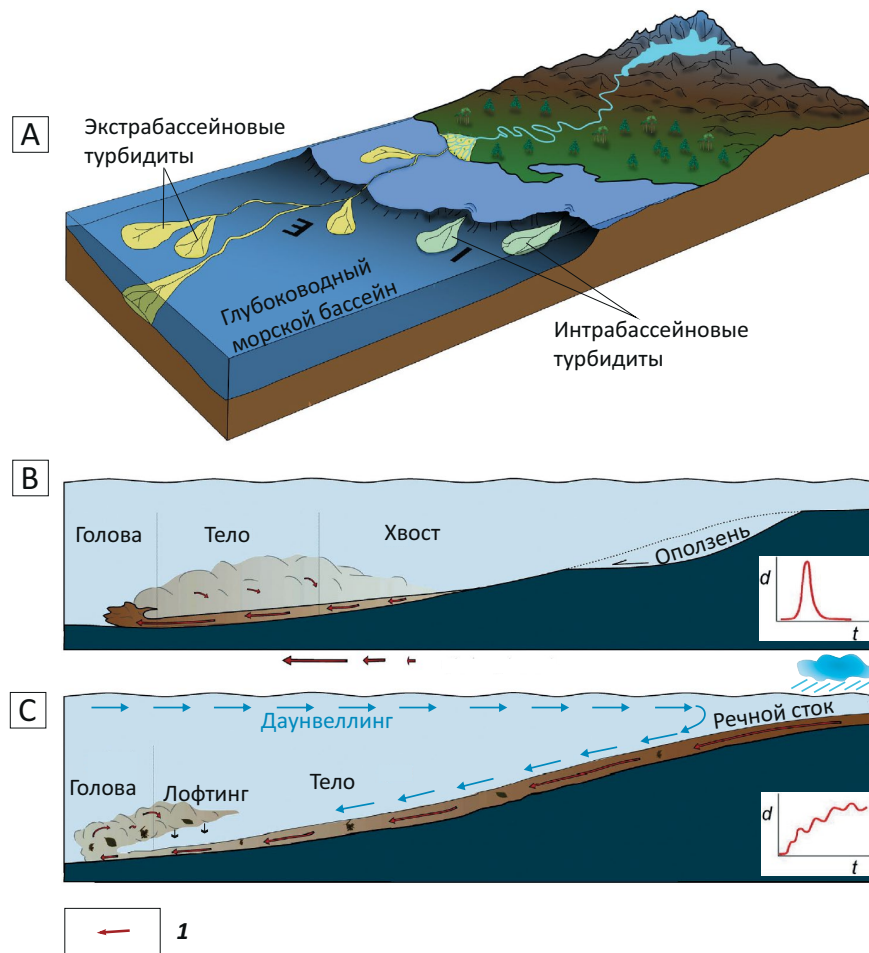


А — конседиментационные деформации (текстуры внедрения) в песчанике мелкозернистом мелкокослоистчатом и алевролите глинистом, содержащие крупный углефицированный растительный детрит (черные стрелки), В — рассеянный углефицированный растительный детрит в массивном мелкозернистом песчанике, проявляющего слабо выраженное полосчатое строение (гибридный поток), С — крупные обломки углефицированной древесины в песчанике мелкозернистом, характеризующемся неоднократными изменениями строения от горизонтально-слоистого к массивному, отражающими флуктуации в скорости гиперпикального турбидитового потока, D — песчаник мелкозернистый с градационной слоистостью, подчеркиваемой рассеянным мелким углистым детритом (в нижней части образца), перекрывается выше тонкогоризонтально-слоистым алевролитом, на который в свою очередь ложится массивный песчаник с крупным обломком углефицированной древесины (черная стрелка) в подошве, E — песчаник мелко-тонкозернистый с мелкой косой слоистостью со сдвоенными слойками (низ образца) и горизонтальной слоистостью (лофтинг ритмы), подчеркнутую углистым растительным детритом, F, G — крупные обломки древесины (больше диаметра ядра) в песчанике на сколах ядра

A — plastic deformations in fine-grained sandstone with fine cross-bedding and clayey siltstone containing plant detritus (black arrows), B — scattered carbonaceous detritus in massive fine-grained sandstone exhibiting weakly banded structure (hybrid flow), C — large fragments of coal in very fine-grained sandstone, characterized by repeated changes in structure from horizontally-layered to massive, reflecting fluctuations in the hyperpycnal turbidite flow rate, D — the fine-grained sandstone with carbonaceous detritus (in the lower part of the sample), overlain by horizontally laminated siltstone, which in turn is overlain by massive sandstone with a large fragment of wood (black arrow) at the base, E — large wooden fragments at the base of the sample) in the fine-grained sandstone, F, G — large wooden fragments (larger than core of diameter) in sandstone

Рис. 3. Блок-диаграмма формирования классических (интрабассейновых — I) и гиперпикальных (экстрабассейновых — E) турбидитов

Fig. 3. Scheme of turbidite formation: classical (intrabasin — I) and hyperpycnal (extrabasin — E)



A — в морском бассейне, B — профили движения для интрабассейновых, C — экстрабассейновых.
 1 — скорость потока.

Длина горизонтальных стрелок показывает изменения скорости потока (по [10] с изменениями)
 t — время, d — сток

A — deep sea; movement profile, B — comparison of the flow behavior of I turbidites, C — sustained E turbidites.

1 — decreasing velocity (according to [10], modified)

t — time, d — discharge

до тех пор, пока энергия потока достаточна для того, чтобы объем осадка, поступающего в поток за счет эрозии дна в головной части потока, превышал количество осадка, уходящего из потока за счет его осадения из более медленно движущейся остальной части потока — тела потока и его хвостовой части.

В процессе движения классического турбидитового потока вниз по склону происходят обтекание окружающей морской водой головы турбидитового потока, а также ее смешивание с турбидитовым потоком во фронтальной зоне головы потока (см. рис. 3 B). В тыловой части головы потока из взвеси осаждаются (возврат в поток) наиболее крупные осадочные частицы, что приводит к постепенному обогащению головы потока наиболее крупнозерни-

стым осадочным материалом и, как следствие, постепенному развитию в голове потока высокоплотного придонного инерционного (зернового) слоя. Остающиеся значительно дольше во взвеси мелкие осадочные частицы вымываются из головы турбидитового потока, осаждаются в более медленно движущихся частях турбидитового потока (его теле и хвостовой части).

Таким образом, наиболее легкий и плавучий растительный материал полностью вымывается из классического турбидитового потока в процессе его движения вниз по склону. В результате присутствие растительных остатков оказывается нехарактерным для отложений классических турбидитовых потоков.

Скорость классического турбидитового потока сначала резко увеличивается вниз по подводному склону (см. рис. 3 В) и затем по мере торможения постепенно снижается в подножии склона.

В отличие от классических турбидитов, непрерывное движение гиперпикнального турбидитового потока вдоль выровненной поверхности морского дна осуществляется за счет постоянного притока (подпора) речной воды из устья реки в период речного паводка, поступающая вода как поршень давит на уже излившуюся на шельф (и прилегающий склон) речную водную массу, обогащенную осадочным материалом (гиперпикнальный поток), придавая ей импульс для дальнейшего поступательного движения в сторону бассейна. Таким образом, придонный гиперпикнальный поток может двигаться на значительные расстояния вдоль выровненной поверхности дна шельфа вплоть до его бровки. На шельфе р. Ориноко по сейсмическим данным выявлены современные подводные гиперпикнальные каналы, протягивающиеся на 150 км по дну от дельты реки до бровки шельфа (рис. 4 А).

Скорость движения гиперпикнального турбидитового потока на склоне (см. рис. 3 С) может несколько повышаться за счет дополнительного действия на поток гравитационной составляющей (одновременно с уменьшением высоты потока) и затем снижаться у подножия склона, но существенно более медленно за счет непрерывной высокой разгрузки в бассейн речной воды в течение всего паводкового периода, приводя к движению потока в бассейн на значительно большее расстояние по сравнению с классическим турбидитовым потоком.

На стадии затухания речного паводка сокращение объема разгрузки речной воды в бассейн приводит к замедлению скорости гиперпикнального турбидитового потока и, в конце концов, его остановке. Это замедление наиболее резко происходит на выровненных участках дна шельфа, где гиперпикнальный поток двигался только за счет давления поступающих на шельф из устья реки новых порций паводковых вод, и более быстро на склоне и его подножии, где движение потока помимо поступления паводковых вод осуществлялось еще и за счет гравитационной составляющей на склоне. После начала замедления гиперпикнального турбидитового потока происходит процесс осаднения взвешенного песчаного материала на всех участках его движения (быстрее на шельфе, медленнее на склоне и у его подножия). По мере осаднения из потока песчаной взвеси постепенно снижается его плотность.

По мере снижения плотности потока, при достижении определенных критических значений плотности (более 1036 кг/м^3), начинается развитие лофтинга (lofting), который заключается в подъеме/отрыве от дна верхней наименее плотной части опресненного потока, обогащенной тонкозернистым алеврито-глинисто-детритовым материалом (см. рис. 3 С), с образованием низкоплотно-

го межпотока (interflow), медленно растекающегося не только в направлении движения потока, но и в стороны от него.

По мере дальнейшего замедления латеральное растекание межпотока приводит к отложению транспортируемого им взвешенного алеврито-глинисто-детритового материала в боковой части турбидитового канала с образованием тонкозернистых наносов (лофтинг ритмитов) подводных прирусловых валов, ограничивающих канал по бокам. Таким образом, образование подводных прирусловых валов могло происходить не только на подводном склоне у его подножия и на прилегающей к слону части подводной равнины, но и в подводных каналах на дне мелководной части шельфа (вплоть до бровки шельфа). Развитие прирусловых валов благоприятно для формирования подводных шельфовых каналов, что способствует устойчивости гиперпикнальных потоков, препятствуя их растеканию.

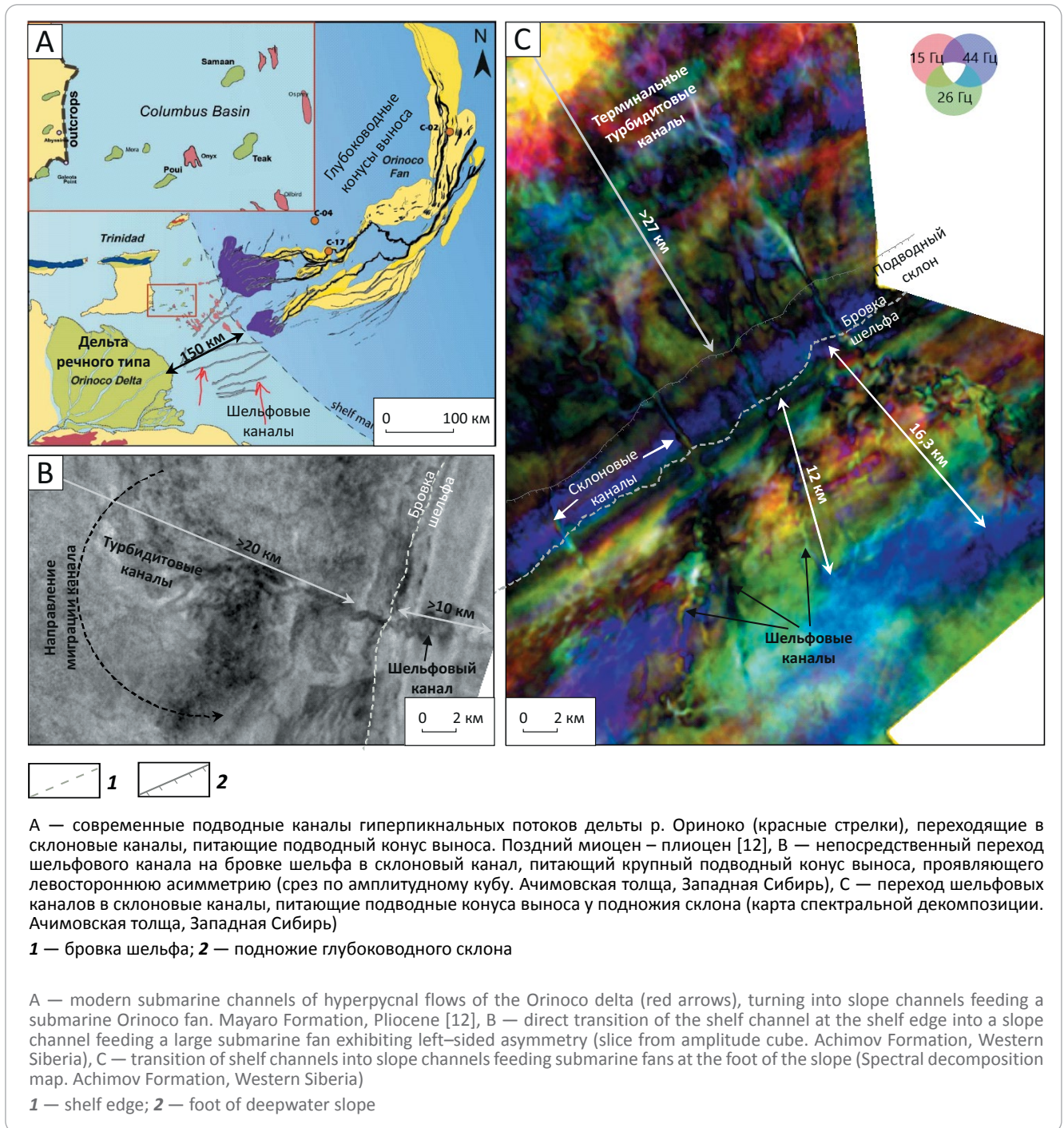
Морфология глубоководных конусов выноса, сформированных гиперпикнальными потоками

На основании анализа результатов 3D-сейсморазведки установлено, что практически все каньоны/склоновые каналы, в устье которых у подножия склона присутствуют крупные подводные конусы выноса, имеют шельфовое русловое питание. Фиксируемое на седиментационных сейсмических срезах и картах спектральной декомпозиции впадение русловых систем на краю шельфа в головную часть подводных склоновых каньонов, прорезающую бровку шельфа, также свидетельствует о речном питании подводных конусов выноса (см. рис. 4 В, С). Если эрозия в голове каньона получает дополнительную энергию за счет перехвата на шельфе речного стока или осадков шельфового дрейфа (шельфовыми течениями), тогда голова каньона может проникать далеко на шельф — на 12 км и более от бровки шельфа.

Форма и размеры подводных конусов выноса ачимовской толщи, сформированных гиперпикнальными турбидитовыми течениями, определялись длительностью речных паводков, а также осадочной нагрузкой реки на суше и объемом водной разгрузки. Более длительные периоды речных паводков и большая величина рек приводили к образованию более крупных подводных конусов выноса, и наоборот. Ранее было установлено, что морфология глубоководных конусов выноса зависит от объема и гранулометрического состава обломочного материала, поставляемого на подводный склон, типа питающей дельты, количества источников питания, угла наклона склона, влияния силы Кориолиса [24], изменения относительного уровня моря и других факторов [25, 26]. Глубоководные конусы выноса, питающиеся дельтой речного типа, как правило, имеют удлиненную форму и преимущественно смешанный или глинистый тип турбидитовой системы.

Турбидитовые распределительные каналы на многих площадях Западной Сибири протягиваются

Рис. 4. Питание глубоководных конусов выноса шельфовыми каналами
 Fig. 4. Deepwater fan feeding by shelf channels



вглубь бассейна на расстояние более 20–27 км (до 40 км) от подножия склона (см. рис. 4 В, С). Выраженность относительно маломощных терминальных каналов на сейсмических срезах может быть обусловлена их песчаным заполнением и тонкозернистым составом ограничивающих прирусловых валов. Быстрое накопление прирусловых валов, ограничивающих терминальные каналы, возможно при их питании гиперпикнальными турбидитовыми потоками. Большинство глубоководных конусов выноса Западной Сибири имеет левостороннюю асимметрию [27] за счет авульсионного смещения

распределительных каналов влево от основного питающего канала (см. рис. 4 В).

Рассмотренные выше особенности процессов осадконакопления в гиперпикнальных турбидитовых течениях должны приводить:

– к отложению хорошо сортированных песчаных наносов с хорошими первичными фильтрационно-емкостными свойствами в высокодинамичных зонах турбидитового осадконакопления — осевой зоне каналов и проксимальных частях лопастей, с постепенным ухудшением свойств в сторону пери-

ферии (дистальных частей). При этом хорошие первичные фильтрационно-емкостные свойства могут быть существенно ухудшены вторичными преобразованиями (карбонатизация, хлоритизация, регенерация кварца и полевых шпатов, сидеритизация по биотиту и др.);

– к формированию вытянутых в сторону бассейна седиментационных турбидитовых лопастей подводных конусов выноса, а сами турбидитовые каналы должны сохранять свою устойчивость на значительном расстоянии и прослеживаться вглубь бассейна даже в пределах дистальной зоны подводного конуса выноса. Это мнение согласуется с данными, полученными по результатам седиментологической интерпретации сейсмических срезов и карт спектральной декомпозиции, на которых в пределах дистальной части подводных конусов выноса видны многочисленные мелкие терминальные турбидитовые каналы, которые могут пересекаться, накладываясь на сформированные в их устьях мелкие терминальные турбидитовые лопасти.

Выводы

1. Детальный седиментологический анализ ачимовских отложений, изученных по керну сква-

жин, и результаты 3D-сейсморазведки указывают на их образование гиперпикнальными (экстрабасейновыми) турбидитовыми потоками, возникновение которых было связано непосредственно с разгрузкой речных паводковых вод в глубоководный морской бассейн.

2. Классические (интрабасейновые) и гиперпикнальные (экстрабасейновые) турбидитовые потоки отличаются друг от друга источниками материала, механизмом движения потоков, особенностями транспортировки осадочного материала потоком, структурой турбидитового потока в процессе движения, составом транспортируемого материала, а также процессами седиментации.

3. Важными отличиями гиперпикнальных турбидитов от классических являются обильное содержание в породах растительных остатков, а также наличие русловых систем, впадающих в головную часть склоновых каналов.

4. Глубоководные конусы выноса, образованные гиперпикнальными потоками, имеют преимущественно вытянутую форму. Более длительные периоды речных паводков и большая величина рек приводили к образованию более крупных подводных конусов выноса, и наоборот.

Литература

1. Гурари Ф.Г. Строение и условия образования клиноформ неокомских отложений Западно-Сибирской плиты (история становления представлений). – Новосибирск : СНИИГИМС, 2003. – 140 с.
2. Решение 5-го межведомственного регионального стратиграфического совещания по мезозойским отложениям Западно-Сибирской равнины / Под ред. И.И. Нестерова. – Тюмень : ЗапСибНИГНИ, 1991. – 54 с.
3. Шиманский В.В., Танинская Н.В., Низяева И.С., Колпенская Н.Н., Раевская Е.Г., Васильев Н.Я., Мясникова М.А., Зельцер В.Н., Грислина М.Н., Мирзоева И.И., Нугуманова А.А. Палеогеография юры и нижнего мела Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции: в 2 кн. Кн. 1. – СПб : ФГБУ «ВНИГНИ», Реноме, 2023. – 232 с.
4. Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А., Карогодин Ю.Н., Конторович В.А., Лебедева Н.К., Никитенко Б.Л., Попова Н.И., Шурыгин Б.Н. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловой период // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 745–776.
5. Алексеев В.П. Атлас субаквальных фаций нижнемеловых отложений Западной Сибири (ХМАО-Югра). – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2014. – 284 с.
6. *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. 3rd edition / Под ред. Н.Г. Reading. – Оксфорд : Blackwell, 1996. – 689 с.
7. Houghton P., Christopher D., McCaffrey W., Barker S. Hybrid sediment gravity flow deposits — Classification, origin and significance // *Marine and Petroleum Geology*. – 2009. – Т. 26 – № 10. – С. 1900–1918. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.02.012.
8. Shanmugam G. Deep-water processes and facies models: implications for sandstone petroleum reservoirs. – Amsterdam, Elsevier, 2006. – Т. 5. – 476 с.
9. Stow D.A.V., Faugères J.-C. Contourite facies and the facies model // *Contourites*. – Amsterdam : Elsevier, 2008. – С. 223–256. DOI: 10.1016/S0070-4571(08)10013-9.
10. Zavala C., Arcuri M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive characteristics // *Sedimentary Geology*. – 2016. – Т. 337. – С. 36–54. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2016.03.008.
11. Zavala C., Arcuri M., Valente L.B. The importance of plant remains as diagnostic criteria for the recognition of ancient hyperpycnites // *Revue de Paléobiologie*. – 2012. – Т. 11. – С. 457–469.
12. Zavala C. Hyperpycnal (over density) flows and deposits // *Journal of Palaeogeography*. – 2020. – № 9. – 21 с. DOI: 10.1186/s42501-020-00065-x.
13. Knapp R.T. Density currents: Their mixing characteristics and their effect on the turbulence structure of the associated flow: *Proceedings of the Second Hydraulics Conference: University of Iowa Studies in Engineering, Bulletin*. – 1943. – № 27. – С. 289–306.
14. Mutti E., Davoli G., Tinterri R., Zavala C. The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basins // *Memorie di Scienze Geologiche*. – 1996. – № 48. – С. 233–291.

15. *Mutti E., Mavilla N., Angella S., Fava L.L.* An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective. *American Association of Petroleum Geologists // Continuing Education Course*. – 1999. – Т. 39. – С. 1–98. DOI: 10.1306/CE39687.
16. *Mutti E., Bernoulli D., Ricci Lucchi F., Tinterrì R.* Turbidites and turbidity currents from Alpine “Flysch” to the exploration of continental margins // *Sedimentology*. – 2009. – Т. 56. – № 1. – С. 267–318. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2008.01019.x.
17. *Normark W.R., Piper D.J.* Initiation processes and flow evolution of turbidity currents: implications for the depositional record // *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication*. – 1991. – Т. 46. – С. 207–230. DOI: 10.2110/pec.91.09.0207.
18. *Pattison S.A.J.* Storm-influenced prodelta turbidite complex in the lower Kenilworth member at Hatch Mesa, Book Cliffs, Utah, USA: implications for shallow marine facies models // *Journal of Sedimentary Research*. – 2005. – Т. 75. – № 3. – С. 420–439. DOI: 10.2110/jsr.2005.033.
19. *Plink-Bjo Rklund P., And Steel R.J.* Initiation of turbidity currents: outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites // *Sedimentary Geology*. – 2004. – Т. 165. – № 1–2. – С. 29–52. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2003.10.013.
20. *Heezen B.C., Menzies R.J., Schneider E.D., Ewing W.M., Granelli N.C.L.* Congo submarine canyon // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1964. – Т. 48. – № 7. – С. 1126–1149. DOI: 10.1306/BC743D7F-16BE-11D7-8645000102C1865D.
21. *Nakajima T.* Hyperpycnites deposited 700 km away from river mouths in the Central Japan Sea // *Journal of Sedimentary Research* – 2006. – Т. 76. – № 1. – С. 59–72. DOI: 10.2110/jsr.2006.13.
22. *Saller A., Li R., Dunham J.* Leaves in turbidite sands: The main source of oil and gas in the deep-water Kutei Basin, Indonesia // *American Association of Petroleum Geologists*. – 2006. – Т. 90. – № 10. – С. 1585–1608. DOI: 10.1306/04110605127.
23. *Mulder T., Syvitski J.P.M., Migeon S., Faugères J.C., Savoye B.* Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review // *Marine and Petroleum Geology*. – 2003. – Т. 20. – № 6–8. – С. 861–882. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2003.01.003.
24. *Khramtsova A.V., Zverev K.V.* Left-sided asymmetry of Neocomian submarine fans of West-Siberian interior sea (Russia) // *A new Journey of Sedimentology: from the Pacific to the Himalaya. Abstract book. 21st International Sedimentological Congress. (Пекин, 22–26 августа 2022).* – Beijing, 2022. – 893 с.
25. *Posamentier H.W., Kolla V.* Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings // *Journal of Sedimentary Research*. – 2003. – Т. 73. – № 3. – С. 367–388. DOI: 10.1306/111302730367.
26. *Никушин А.М., Альмендингер О.А., Митюков А.В., Посаментьер Х.В., Рубцова Е.В.* Глубоководные осадочные системы: объемные модели, основанные на 3D сейсморазведке и полевых наблюдениях. – М.: МАКС Пресс, 2012. – 109 с.
27. *Храмцова А.В., Зверев К.В.* Асимметрия морфологии и гиперпикнальный генезис турбидитов ачимовской толщи Западной Сибири // *Литогенез и минералогия осадочных комплексов докембрия и фанерозоя Евразии. Материалы X Международного совещания по литологии (Воронеж, 18–23 сентября 2023 г.).* – Воронеж, 2023. – С. 466–469.

References

1. *Gurari F.G.* Clinofolds architecture and conditions of their formation in the Neocomian deposits of West Siberian Plate (concepts evolution history). Novosibirsk: SNIIGGIMS; 2003. 140 p. In Russ.
2. *Resheniya V Mezhdvedomstvennogo regional'nogo stratigraficheskogo soveshchaniya po mezozoiskim otlozheniyam Zapadno-Sibirskoi ravniny* [Decisions of the V Interagency meeting on regional stratigraphy of Mesozoic sequences in the West Siberian Plain]. Tyumen: ZapSibNIGNI; 1991. 54 p. In Russ.
3. *Shimanskii V.V., Taninskaya N.V., Nizyaeva I.S., Kolpenskaya N.N., Raevskaya E.G., Vasil'ev N.Ya., Myasnikova M.A., Zel'tser V.N., Grislina M.N., Mirzoeva I.I., Nugumanova A.A.* Paleogeografiya yury i nizhnego mela Zapadno-Sibirskoi neftegazonosnoi provintsii [Paleogeography of the Jurassic and Lower Cretaceous of the West Siberian oil and gas province]: v 2 kn. Kn. 1. – Sankt-Peterburg : FGBU «VNIGNI», Renome, 2023. – 232 s. In Russ.
4. *Kontorovich A.E., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Karogodin Yu.N., Kontorovich V.A., Lebedeva N.K., Nikitenko B.L., Popova N.I., Shurygin B.N.* Cretaceous paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Russian Geology and Geophysics*. 2014;55(5–6):582–609.
5. *Alekseev V.P.* Atlas subakval'nykh fatsii nizhnemelovykh otlozhenii Zapadnoi Sibiri (KhMAO-Yugra) [Atlas of subaqueous facies of Lower Cretaceous sediments of Western Siberia (KhMAO-Yugra)]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 2014. 284 p. In Russ.
6. *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. 3rd Edition. In: H.G. Reading. In H.G. Reading. Blackwell, Oxford, 1996. 689 p.
7. *Haughton P., Christopher D., McCaffrey W., Barker S.* Hybrid sediment gravity flow deposits — Classification, origin and significance. *Marine and Petroleum Geology*. 2009;26(10):1900–1918. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.02.012.
8. *Shanmugam G.* Deep-water processes and facies models: implications for sandstone petroleum reservoirs. Amsterdam, Elsevier, 2006;(5):476 p.
9. *Stow D.A.V., Faugères J.-C.* Contourite facies and the facies model. Contourites. Amsterdam : Elsevier, 2008. pp. 223–256. DOI: 10.1016/S0070-4571(08)10013-9.
10. *Zavala C., Arcuri M.* Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive characteristics. *Sedimentary Geology*. 2016;(337)36–54.
11. *Zavala C., Arcuri M., Valente L.B.* The importance of plant remains as diagnostic criteria for the recognition of ancient hyperpycnites. *Revue de Paléobiologie*. 2012;(11):457–469.
12. *Zavala C.* Hyperpycnal (over density) flows and deposits. *Journal of Palaeogeography*. 2020;(9):p.21. DOI: 10.1186/s42501-020-00065-x.

13. Knapp R.T. Density currents: Their mixing characteristics and their effect on the turbulence structure of the associated flow: Proceedings of the Second Hydraulics Conference: University of Iowa Studies in Engineering, Bulletin. 1943;(27):289–306.
14. Mutti E., Davoli G., Tinterri R., Zavala C. The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basins. *Memorie di Scienze Geologiche*. 1996;(48):233–291.
15. Mutti E., Mavilla N., Angella S., Fava L.L. An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective. American Association of Petroleum Geologists. *Continuing Education Course*. 1999;(39):1–98. DOI: 10.1306/CE39687.
16. Mutti E., Bernoulli D., Ricci Lucchi F., Tinterri R. Turbidites and turbidity currents from Alpine “Flysch” to the exploration of continental margins. *Sedimentology*. 2009;56(1):267–318. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2008.01019.x.
17. Normark W.R., Piper D.J. Initiation processes and flow evolution of turbidity currents: implications for the depositional record. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*. Special Publication. 1991;(46):207–230. DOI: 10.2110/pec.91.09.0207.
18. Pattison S.A.J. Storm-influenced prodelta turbidite complex in the lower Kenilworth member at Hatch Mesa, Book Cliffs, Utah, USA: implications for shallow marine facies models. *Journal of Sedimentary Research*. 2005;75(3):420–439. DOI: 10.2110/jsr.2005.033.
19. Plink-Bjo Rklund P., And Steel R.J. Initiation of turbidity currents: outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites. *Sedimentary Geology*. 2004;165(1–2):29–52. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2003.10.013.
20. Heezen B.C., Menzies R.J., Schneider E.D., Ewing W.M., Granelli N.C.L. Congo submarine canyon. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1964;48(7):1126–1149. DOI: 10.1306/BC743D7F-16BE-11D7-8645000102C1865D.
21. Nakajima T. Hyperpycnites deposited 700 km away from river mouths in the Central Japan Sea. *Journal of Sedimentary Research*. 2006;76(1):59–72. DOI: 10.2110/jsr.2006.13.
22. Saller A., Li R., Dunham J. Leaves in turbidite sands: The main source of oil and gas in the deep-water Kutei Basin, Indonesia. *American Association of Petroleum Geologists*. 2006;90(10):1585–1608. DOI: 10.1306/04110605127.
23. Mulder T., Syvitski J.P.M., Migeon S., Faugères J.C., Savoye B. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review. *Marine and Petroleum Geology*. 2003;20(6–8):861–882. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2003.01.003.
24. Khramtsova A.V., Zverev K.V. Left-sided asymmetry of Neocomian submarine fans of West-Siberian interior sea (Russia) // A new Journey of Sedimentology: from the Pacific to the Himalaya. Abstract book. 21st International Sedimentological Congress. (Beijing, 22–26 august 2022). Beijing, 2022. 893 p.
25. Posamentier H.W., Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings // *Journal of Sedimentary Research*. 2003;73(3):367–388. DOI: 10.1306/111302730367.
26. Nikishin A.M., Al'mendinger O.A., Mityukov A.V., Posamentier Kh.V., Rubtsova E.V. Glubokovodnye osadochnye sistemy: ob'emnye modeli, osnovannye na 3D seismorazvedke i polevykh nablyudeniya [Deep-sea sedimentary systems: volumetric models based on 3D seismic and field observations]. Moscow: MAKS Press, 2012. 109 p. In Russ.
27. Khramtsova A.V., Zverev K.V. Asimetriya morfologii i giperpyknal'nyi genezis turbiditov achimovskoi tolshchi Zapadnoi Sibiri [Asymmetry of morphology and hyperpycnal genesis of turbidites of the Achimov formation of Western Siberia] Litogenez i minerageniya osadochnykh kompleksov dokembriya i fanerozoia Evrazii. Materialy X Mezhdunarodnogo soveshchaniya po litologii (Voronezh, 18–23 September 2023). Voronezh, 2023. pp. 466–469. In Russ.

Информация об авторах

Храмцова Алена Валерьевна

Кандидат геолого-минералогических наук,
эксперт по литологии и седиментологии
терригенных резервуаров
ООО «Тюменский нефтяной научный центр»,
625003 Тюмень, ул. Перекопская, д. 19
e-mail: avkhramtsova@rosneft.ru
ORCID ID: 0009-0003-7017-5578

Зверев Константин Витальевич

Кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий эксперт
ООО «Газпромнефть научно-технический центр»
625048 Тюмень, ул. 50 лет Октября, д. 14
e-mail: Zverev.KV@gazpromneft-ntc.ru

Мельников Александр Валерьевич

Менеджер
ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
625003 Тюмень, ул. Перекопская, 19
e-mail: avmelnikov2@tnnc.rosneft.ru
ORCID ID: 0000-0002-4587-1788

Information about authors

Alena V. Khramtsova

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Lithology
and Sedimentology Expert
Tyumen Oil Research Center,
19, ul. Perekopskaya, Tyumen, 625003, Russia
e-mail: avkhramtsova@rosneft.ru
ORCID ID: 0009-0003-7017-5578

Konstantin V. Zverev

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
leading expert
LLC Gazpromneft Scientific and Technical Center
625048, Tyumen, st. 50 Let Oktyabrya, 14
e-mail: Zverev.KV@gazpromneft-ntc.ru

Alexander V. Melnikov

Manager
LLC Tyumen Petroleum Research Center
625003, Tyumen, st. Perekopskaya, 19
e-mail: avmelnikov2@tnnc.rosneft.ru
ORCID ID: 0000-0002-4587-1788