

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТЯХ БЫСТРОГО И СВЕРХБЫСТРОГО ОСАДКОАКОПЛЕНИЯ (ЛАВИННОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ) В СВЯЗИ С ОБРАЗОВАНИЕМ НЕФТИ И ГАЗА В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

А.П. Лисицын

Институт океанологии РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия

Исследованиями морей и океанов за последние десятилетия установлена крайняя неравномерность в распределении мощностей донных осадков (от десятков метров до 15—20 тыс. м). Определены главные скопления осадочного вещества на трех глобальных уровнях: граница река—море (нулевой уровень, базис эрозии континентов); основание континентального склона (уровень 3—5 тыс. м); глубоководные впадины (уровень 6—11 тыс. м). Здесь седиментация идет с лавинными скоростями, причем в осадках сохраняется значительное количество органики, что делает их перспективными на нефть и газ. Рассмотрены отложения областей лавинной седиментации, которые имеют особые реологические свойства и перемещаются по поверхности дна в направлении уклона на расстояния в многие сотни километров. Континентальный склон — глобальная область разгона гравититов, потенциальная энергия которой определяется перепадом глубин в 3—5 тыс. м. Глобальные перемещения главных масс осадочного вещества связаны с изменениями уровня Мирового океана. При этом образуются главные в океанах и морях по объему (и нефтегазоносному потенциалу) скопления осадочного вещества у основания склона (глобальный педимент) на втором уровне лавинной седиментации. В соответствии с прогнозами обнаружены и эксплуатируются на глубинах моря более 3.5 тыс. м гигантские месторождения нефти и газа — вероятный резерв человечества на XXI век.

Литология, гравититы, глобальные уровни, лавинная седиментация, континентальный склон, оползни, турбидиты, подводные русла, глобальный педимент, нефтегазовый потенциал склонов, Мировой океан.

PATTERNS OF RAPID AND EXTREMELY RAPID (AVALANCHE) SEDIMENTATION: IMPLICATIONS FOR MARINE OIL AND GAS GENERATION

A.P. Lisitsyn

According to recent data from seas and oceans, marine sediments have extremely uneven thicknesses varying from tens of meters to 15—20 km. Sedimentary material is localized mainly at three global levels: river—sea boundary (zero level, continental base of erosion), continental rise (3—5 km), and trenches (6—11 km). As a result of extremely rapid (“avalanche”) deposition in trenches, large amounts of organic matter accumulate in bottom sediments, thus providing their high petroleum reservoir potential. Sediments in areas of rapid sedimentation have a particular rheology, which causes them to move downslope hundreds of kilometers on the sea floor. Continental rise is a global area where gravities accelerate, with their potential energy due to a depth difference of 3 to 5 km. Global-scale drift of sedimentary masses driven by eustatic sea level change produces very large deposition zones rich in oil and gas at the continental rise (global piedmont), i.e., at the second level. Predicted oil and gas fields of this kind have been discovered recently at sea depths over 3.5 km, which lie in stock for future development through the 21st century.

Lithology, gravities, global sedimentation levels, avalanche sedimentation, continental slope, landslide, turbidite, submarine channels, global piedmont, oil and gas potential of slope reservoirs, seas and oceans

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ранее показано [Лисицын, 1988], что главная часть осадочного вещества Земли (более 90 %) по данным исследования морей и океанов не рассеивается на огромных пространствах дна морей и океанов, а концентрируется непосредственно близ мест своего поступления в океан или у основания континентальных склонов — в осадочно-породных бассейнах лавинной седиментации. Изъятие из общего баланса морей и океанов подавляющей части осадочного вещества приводит к его дефициту в пелагиали, к широкому распространению участков неотложения или размыва, к возникновению перерывов в осадконакоплении.

Вследствие неравномерности в количественном распределении осадочного вещества [Безруков, 1967] происходят существенные изменения в самом процессе осадкообразования. Лавинные его скорости

приводят к возникновению особых свойств осадочных образований, к преобладанию горизонтальных (а не вертикальных, как для нормального осадочного процесса) перемещений вещества разного рода гравитационными потоками. Такие отложения называют гравититами. На основе имеющихся данных можно утверждать, что именно отложения областей лавинной седиментации (гравититы) в разрезах Мирового океана (современных и геологического прошлого) составляют по объему и по мощности главную часть всех донных осадков. Осадконакопление обычного типа «частица за частицей», хотя и распространено на огромных площадях дна, однако по сравнению с лавинными процессами отходит далеко на второй план. Это главный по площади, но второстепенный по объему тип седиментации. Переоценка роли осадочных образований в истории Земли с безусловным диктатом гравититов всех типов, а также высокие содержания органического вещества в этих образованиях, скопление нефти и газа в них заставляют вновь обратиться к этим процессам, чтобы привлечь внимание геологов и геохимиков.

Прямые исследования концентрации взвешенного вещества (взвеси) в воде, а также исследования скоростей современного осадконакопления, абсолютных масс, мощностей и объемов осадочных отложений показывают, что распределение осадочного вещества на дне морей и океанов характеризуется крайней неравномерностью. Главная часть осадочного материала накапливается близ мест поступления — на участках быстрого и сверхбыстрого осадконакопления. Если для большей части дна Мирового океана характерны скорости седиментации от менее 1 до 10 мм/1000 лет, то для участков быстрого осадконакопления — 100—1000 мм/1000 лет, а для сверхбыстрого — более 1000 мм/1000 лет (единиц Б — единиц Бубнова) (рис. 1).

Высокие скорости седиментации приводят и к существенным качественным изменениям осадков — к высокой их обводненности, а это в свою очередь — к неустойчивости на склонах, к значительному содержанию органического вещества (благодаря его лучшей сохранности при быстром уходе из окислительной обстановки морской среды), особому геохимическому облику, структурам, текстурам и др.

Процессы с высокими и сверхвысокими скоростями седиментации названы автором [Лисицын, 1982, 1983—1986, 1988] лавинной седиментацией, поскольку их можно сопоставить с лавинным накоплением снега в горах [Лосев, 1983; Котляков, 1994] или лавинными электронными процессами, ураганными концентрациями элементов в геохимии.

Для «нормального» осадочного процесса по закону Стокса наиболее существенными являются размеры частиц, глубина бассейна седиментации и течения в нем. Для распределения гравититов наиболее значимы такие параметры, как относительные перепады рельефа, крутизна и устойчивость склонов, сейсмичность района и реологические свойства осадка. Размеры частиц исходного материала, течение и глубина имеют второстепенное значение. Если в осадках с нормальными скоростями (меньше 100 мм/1000 лет) главный процесс — это осаждение, то в областях лавинной седиментации распределение осадочного вещества определяется в основном процессами гравитационного перемещения вещества с верхних гипсометрических уровней на нижние, т.е. значительную роль в формировании осадочных тел приобретает рельеф (тектоника). Закономерности осадконакопления существенно отличаются от закономерностей, присущих областям «нормальной» седиментации.

Детальными исследованиями, проведенными за последние десятилетия, удалось установить, что и на современном этапе главная часть осадочного вещества накапливается не на огромных площадях дна Мирового океана, а на небольших по площади, часто разрозненных друг от друга (автономных) участках по периферии континентов — бассейнах лавинной седиментации [Лисицын, 1988]. В них мощность осадочных образований нередко превышает 10 км, в то время как в пелагиали она обычно меньше 1 км (в среднем для Мирового океана 451 м) (см. рис. 1).

Одним из важнейших новых направлений изучения осадочного процесса в море стало изучение осадочного вещества в водах морей и рек (рис. 2), т.е. от мест его зарождения и поступления, через толщу морских вод до накопления в донных осадках. Изучение взвешенных в ничтожных количествах в морской воде микро- и наночастиц разного состава для целей геологии (средняя концентрация около 0.0001 г/л) было начато автором в 1953—1955 гг. [Лисицын, 1955, 1956а,б, 1961]. Далее эти исследования по единой программе и методике развивались более чем в 300 экспедициях, проведенных Институтом океанологии в разных частях Мирового океана на протяжении десятков лет, и были поддержаны многочисленными работами зарубежных ученых.

В настоящее время мы имеем полную трехмерную картину количественного распределения и состава осадочного вещества в толще вод Мирового океана во многом более детальную, чем карты донных осадков.

В 70—80-е годы прошлого столетия эти исследования осадочного процесса удалось дополнить еще также инситу изучением осадконакопления во времени, причем на любых глубинах и в любых частях океанов с помощью так называемых седиментационных ловушек (рис. 3). Седиментационные ловушки — это пластиковые конусы, имеющие в нижней части револьверное устройство для отбора проб с заданными интервалами времени в флаконы. Ловушки устанавливаются на тросе вместе с гидроло-

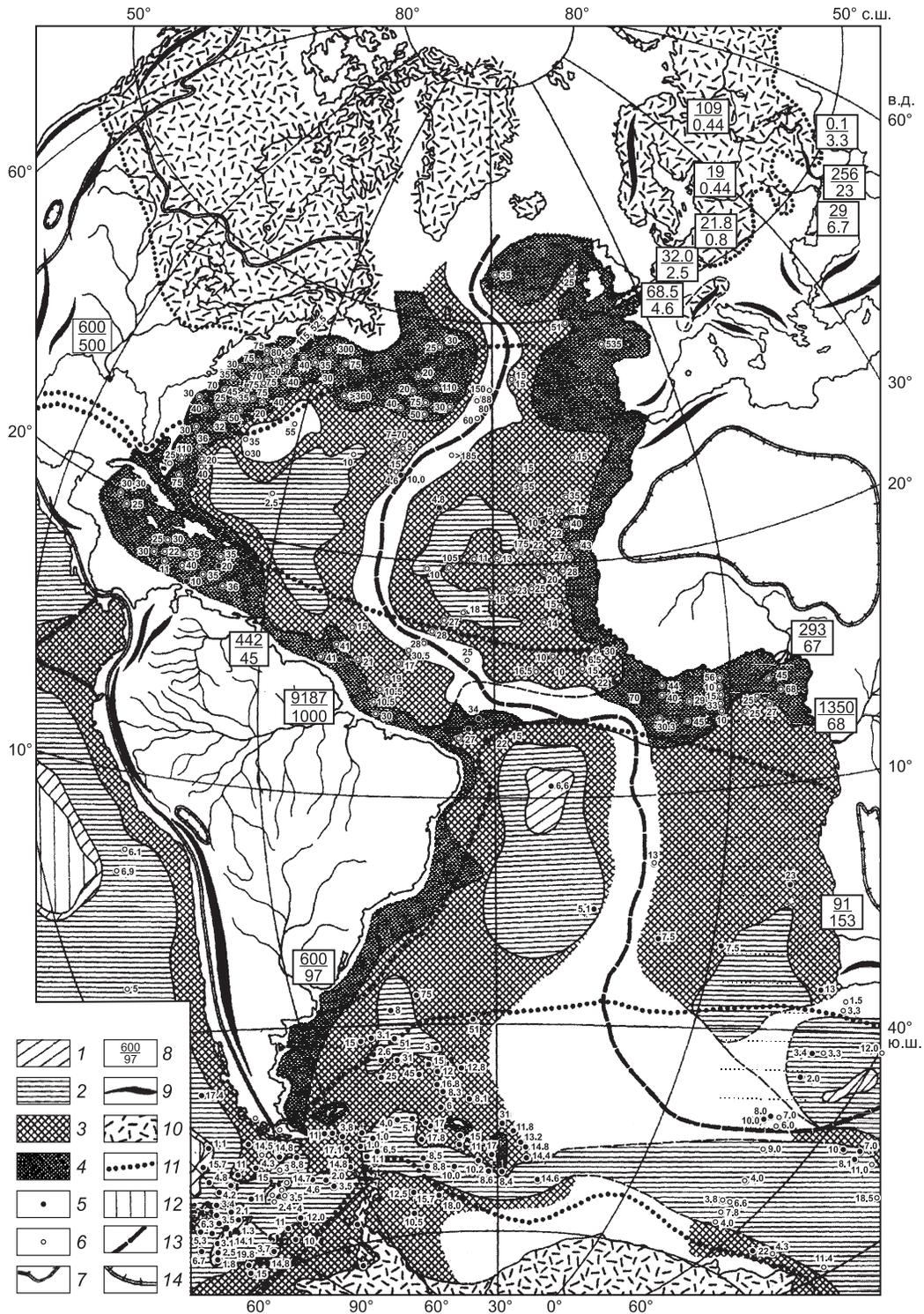


Рис. 1. Схема скоростей седиментации современных осадков Атлантического океана [Лисицын, 1974].

Скорости осадконакопления, мм/1000 лет (Б): 1 — меньше 3; 2 — от 3 до 10; 3 — от 10 до 30; 4 — от 30 до 50 и более 50. Точки — места определения скоростей. Цифры — фактические значения: 5 — определения палеомагнитными методами; 6 — определения радиохронологические и др.; 7 — границы водосбора; 8 — сток крупнейших рек (жидкий — числитель, км³/год, знаменатель — твердый, млн т/год); 9 — основные хребты и горные системы суши; 10 — области четвертичного оледенения; 11 — границы основных климатических зон; 12 — скорости седиментации меньше 1 мм/1000 лет; 13 — Срединный Атлантический хребет; 14 — область внутреннего стока и бессточная.



Рис. 2. Мощности осадочной толщи на дне морей и океанов по данным геофизических исследований и глубоководного бурения [Лисичин, 1988]. С максимальными мощностями связаны глубоководные месторождения нефти и газа.

Мощности осадочных отложений, км: 1 — менее 1 км (включая области конденсированных осадков и размыва), 2 — от 1 до 3, 3 — более 3; 4 — более 3; 5 — от 1 до 3, 3 — более 3; 4 — более 3 и 0.5 км для областей с малыми мощностями; 5 — контуры материков и островов.

Область высоких и сверхвысоких скоростей седиментации в морях Юго-Восточной Азии не показана.

Рис. 3. Схема притопленной седиментационной платформы для круглогодичного инситного изучения потоков осадочного вещества в толще вод морей и океанов.

1 — буй поисковый; 2 — плавучесть (подъемная сила 100—300 кг); 3 — ловушка седиментационная для определения круглогодичного (интегрального) потока осадочного вещества ($\text{г/м}^2/\text{год}$); 4 — ловушка седиментационная для месячного ($\text{мг/м}^2/\text{мес}$ или $\text{мг/м}^2/\text{сут}$) определения потоков (дифференциальная), 12-стаканная с револьверным устройством и микропроцессором; 5 — вертушка гидрологическая для круглогодичного изучения течений (направление и скорость); 6 — размыкатель троса акустический, обеспечивает по команде всплытие платформы и ее поиск гидроакустическими методами; 7 — донный якорь, масса 400—600 кг; 8 — поверхность дна.

гическими вертушками, что позволяет изучать не только вертикальный поток, но и горизонтальный перенос (адвекцию) вещества в процессе его осаждения. Впервые удастся определять «инситно» вектор потока осадочного вещества в многокилометровой толще вод, его изменения в пространстве и во времени на данной глубине. Такие «седиментационные станции»-платформы — одиночные или целые «седиментационные разрезы» водной толщи — сопоставляются с донными осадками, современными для их верхнего слоя или древними (колонки и керны бурения). Например, несколько лет на Белом море круглогодично работает 8—10 седиментационных платформ с несколькими ловушками, расположенными по вертикали от поверхности до придонного слоя. Особый интерес вызывает изучение разрезов река—море, которые выполнены для крупнейших рек Сибири: Лены, Енисея, Оби, а также для Северной Двины и других крупных рек, образующих области лавинной седиментации.

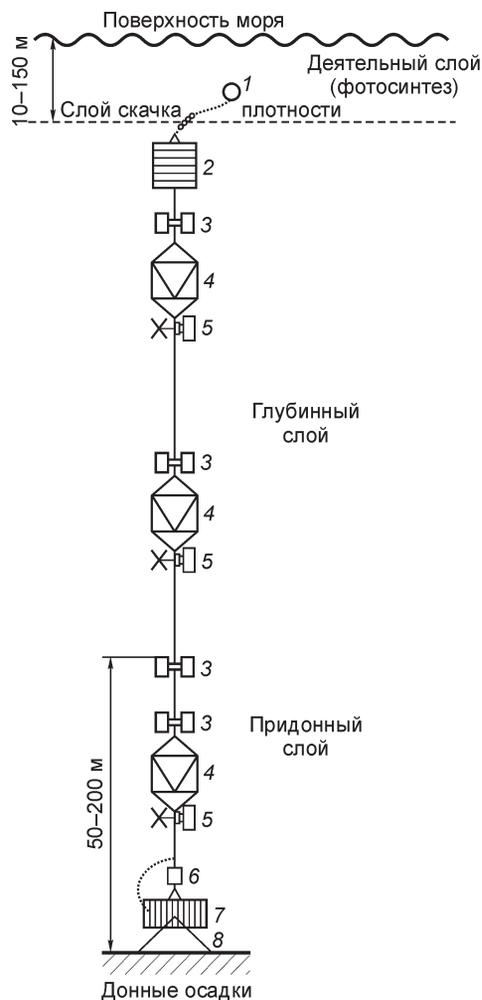
Эти исследования осадочного вещества в водной толще удалось значительно усовершенствовать, используя спутниковые [Бондур, 2004; Копелевич и др., 2004], гидрооптические, гидроакустические и гидрофизические данные, т.е. дополнить их дистанционными материалами, которые удастся получать на судне подобно сейсмическому изучению осадочной толщи.

Таким образом, удалось впервые увидеть и изучить в деталях осадочное вещество, не только захороненное в донных осадках, но и «живое» на всех этапах его жизни — от захвата речными водами и переноса в моря и океаны и до осаждения через водную толщу и аккумуляцию в виде донных осадков. Это инситное изучение осадочного вещества в водах рек, морей и океанов показало, что важную, а в ряде мест и определяющую роль в осадочном процессе играют не только речная взвесь, как принято считать, но и другие источники осадочного вещества, которые ранее прослеживались и в донных осадках — биогенный, аэрогенный (аэрозольный), ледовый, вулканогенный и даже космогенный.

В связи с этим было начато инситное исследование осадочного вещества всех геосфер также по единой программе и едиными методами [Лисицын, 2001а,б, 2004а]. Возникло новое направление прямого (инситного) седиментологического, геохимического, минералогического, биологического и другого изучения дисперсии из этих геосфер. Это исследование, подобно таковому водных толщ рек, морей и океанов, сейчас стало четырехмерным, т.е. изучение вещества всех геосфер в пространстве (3D) и во времени (4D) [Лисицын, 2003].

Изучение осадочного вещества во всех геосферах — количественное и качественное — по единой программе позволило рассматривать донные осадки морей и океанов как гигантскую седиментационную ловушку площадью 71 % поверхности планеты, которая собирает осадочный материал всех поверхностных геосфер. Это позволяет изучать и их взаимодействие как в пространстве Мирового океана, так и во времени. С применением глубоководного бурения — до максимального возраста литосферных плит на дне океана — около 160 млн лет. Открываются также особенно ценные для геолога возможности восстановления условий среды и климата по данным инситных исследований по записям, сделанным осадочным веществом всех геосфер и в толще вод, и в толще донных осадков.

Цель настоящей работы — сравнительный анализ закономерностей формирования лавинных и нормальных пелагических отложений в Мировом океане, выявление закономерностей накопления глав-



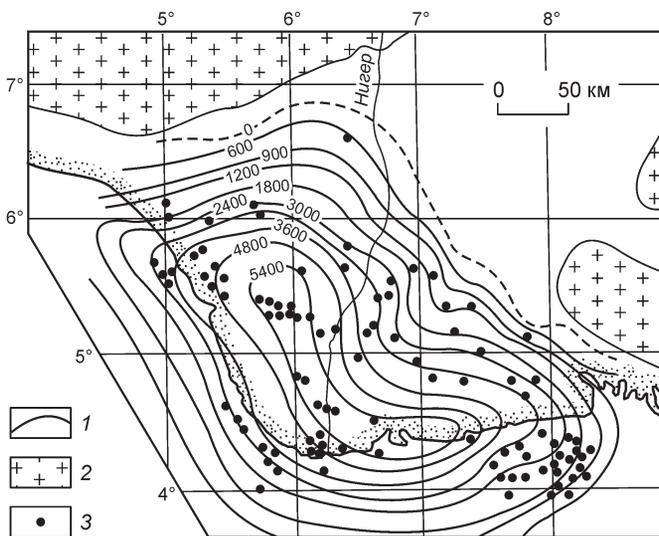


Рис. 4. Нефтегазоносность на первом уровне лавинной седиментации. Маргинальный фильтр р. Нигер [Авбово, 1982].

Мощность осадочной толщи в депоцентре более 5.4 км, изостатическая компенсация. 1 — изобахиты, м; 2 — кристаллические породы щита; 3 — буровые скважины.

ных по массе скоплений осадочного вещества на Земле — сейчас и в прошлом, во взвеси и в донных осадках.

Крайняя неравномерность распределения осадочного вещества в океане с его избыточной концентрацией в отдельных местах неизбежно ведет к дефициту осадочного вещества в других местах — к возникновению конденсированных осадков и перерывов.

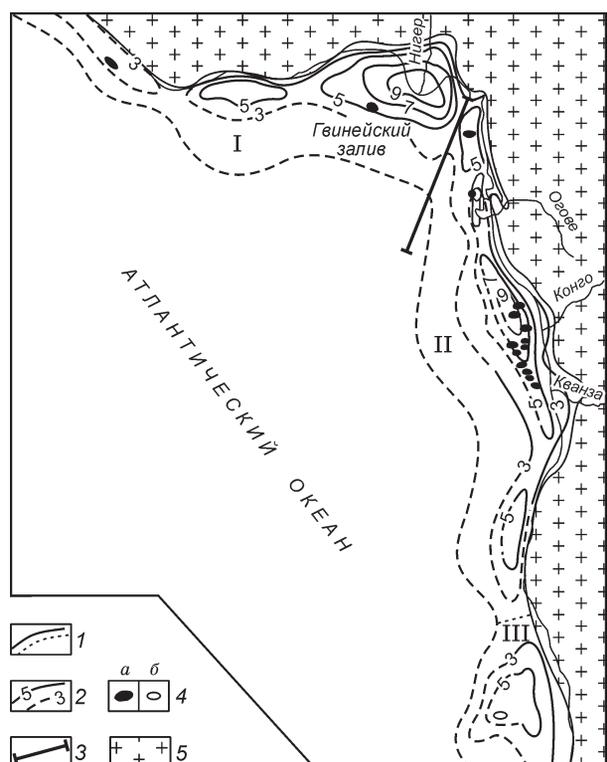
Поскольку для лавинной седиментации решающее значение имеет гипсометрическое положение, то удастся выделить три главных глобальных уровня седиментации, отвечающих перегибам гипсографической кривой Земли, т.е. местам, где теряется живая сила гравитационных потоков. Эти уровни: 1 — устья рек, 2 — основания континентальных склонов, 3 — глубоководные впадины (желоба) активных окраин континентов. Они различаются по высотному положению на 4—10 км, связаны между собой осадками по вертикали, образуют единую седиментационную систему Земли. Перемещение осадочного вещества с одного уровня на другой, возникновение крупных перерывов на одном уровне и одновременно лавинной седиментации на другом взаимосвязаны в глобальном масштабе и во времени, т.е. синхронны, но противофазны. Они определяются в основном колебаниями уровня океана во времени и являются самописцами этих колебаний. Уровень океана — это природный регулятор лавинной седиментации в общем направлении силы тяжести, т.е. с первого уровня (устья рек) на второй (основание склона) и в желоба — третий в глобальных масштабах. Обратный ряд перемещения рыхлого осадочного вещества невозможен [Лисицын, 1988].

Обстановка осадкообразования в местах с быстрыми скоростями седиментации определяется не только значениями скоростей, но также и тем, что осадкообразование здесь (особенно у основания материкового склона) действительно напоминает обстановку лавин: гравитационные перемещения осадочного материала (оползни, обвалы, порождаемые ими грязевые потоки и турбидиты) по существу представляют собой подводные лавины склонов, отсюда и термин лавинная седиментация.

По масштабам эти явления, проходящие под водой и незаметные для наблюдателя, намного превосходят все то, что известно на континентах. При перепадах гипсометрических отметок склона в 4—5 тыс. м подводные лавины могут приобретать огромную живую силу. Объем осадочного материала в них нередко достигает 10—30 км³, а масса — в десятки миллиардов тонн! При низвержении таких масс с «заоблачных высот» (на 2—5 тыс. м) возникают разнообразные гравититы, и дальность распространения концентрированных и в разной степени разбавленных водой потоков осадочного материала нередко достигает 2—3 тыс. км!

Рис. 5. Нефтегазоносность континентального склона Африки [Забанбарк, 2002] — второй уровень лавинной седиментации.

1 — граница осадочных бассейнов; 2 — изобахиты, км; 3 — разрывные нарушения; 4 — месторождения: а — нефтяные, б — газовые; 5 — выходы докембрия. Нефтегазоносные бассейны: I — Гвинейский залив; II — Кванза-Камерунский; III — Намибия.



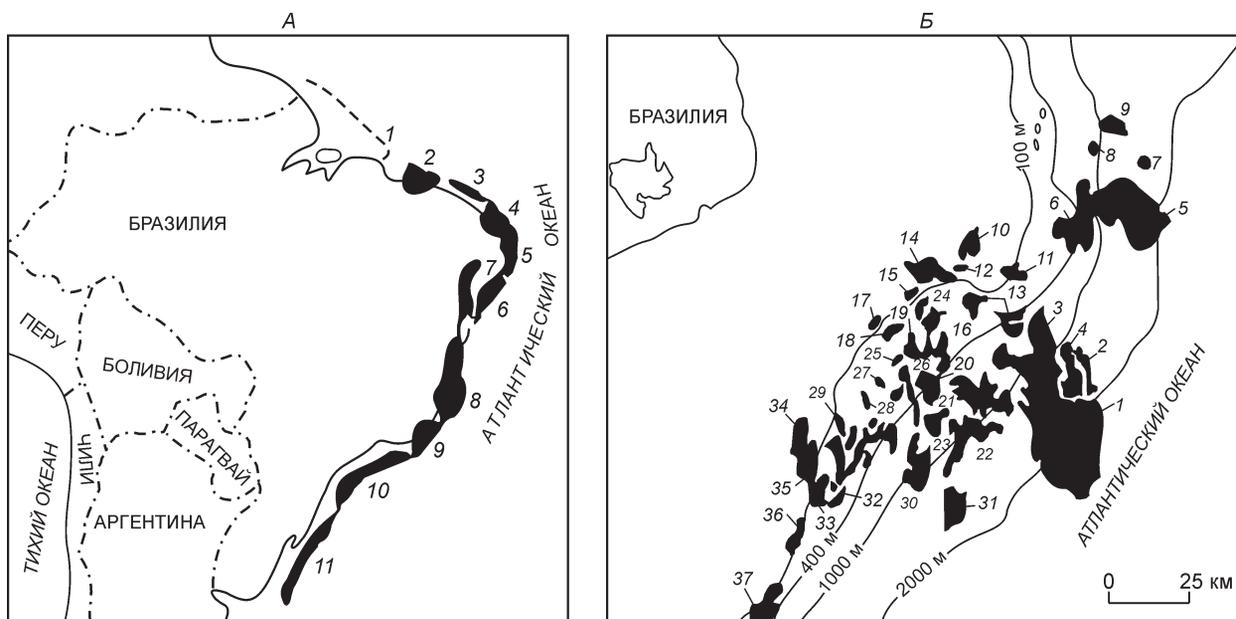


Рис. 6. Нефтегазоносность континентального склона Южной Америки [Забанбарк, 2001].

А — размещение основных осадочных бассейнов: 1 — границы дельты р. Амазонки, 2 — Баррейриньяс; 3 — Сеаре; 4 — Потигуар; 5 — Пернамбуко-Парайба; 6 — Серджипе-Алагос; 7 — Байя; 8 — Эспирито-Санто; 9 — Кампос; 10 — Сантос; 11 — Пелатос. *Б* — группа нефтяных и газовых месторождений Кампос, действующих и подготавливаемых к эксплуатации: 1—37 — отдельные месторождения.

Материковый склон протяженностью около 350 тыс. км с перепадом глубин 4—5 тыс. м представляет собой как бы гигантскую, глобальную «фабрику» гравититов всех разновидностей. Самые крупные из закартированных оползней имеют объем в 10—100 раз выше, чем приведенный. Так объем оползня Сторега на склоне Норвегии с площадью целой страны составляет около 3900 км³, а дальность перемещения материала в нем достигает 500 км. Объем только одного такого оползня более чем в 300 раз превышает годовую поставку в Мировой океан осадочного материала всеми реками Мира [Лисицын, 1988].

Верхний глобальный уровень накопления осадочного вещества (в устьях рек) создает глобальную систему уникальных седиментационных ловушек на границе пресных и соленых вод, которые действуют с эффективностью около 90 %. По данным автора, полученным независимыми методами (см. ниже), через эту ловушку «проскакивает» только около 7 % от взвешенного стока рек (т.е. всего 0.8 км³ из 12 км³ ежегодной поставки речной взвеси в устья рек).

Верхний уровень лавинной седиментации отвечает современному высокому и продолжающему повышаться (скорость 1—2 мм в год) уровню океана. При снижении уровня одновременно для всей планеты идет сброс осадочного вещества из этих мест временного накопления в устьях рек с шельфа на нижний уровень (основание склона), в места постоянного хранения основной части осадочного вещества Земли. Такие массовые переброски приводят к возникновению многочисленных перерывов и несогласий, которые обнаруживаются в строении устьевых и шельфовых отложений с помощью сейсмостратиграфии и бурения.

Возникновение перерывов, даже глобальных, вовсе не означает, что осадконакопление полностью прекращалось: оно перемещалось с одного глобального уровня, где накапливалась главная часть вещества, на другой. В связи с этим возникал дефицит на верхнем уровне и одновременно с этим лавинное накопление на нижнем (принцип противофазы).

Крупные перерывы в осадконакоплении на одном гипсометрическом уровне тесно связаны (как в пространстве, так и во времени) с лавинной седиментацией на другом — это как бы две сменяющие друг друга фазы в процессе циклической (двухфазной) седиментации. Наконец, процессы лавинной седиментации существенны не только потому, что ими определяется формирование гигантских — самых крупных на Земле — осадочных тел, но, что особенно важно, и главных типов образований с особыми свойствами, к ним приурочены и крупнейшие скопления минерального сырья, в первую очередь недавно открытые глубоководные (на глубинах моря 3—5 км) месторождения нефти и газа (рис. 4—6).

В настоящей работе мы касаемся только одного из типов лавинной седиментации — терригенного, который играет важное значение в формировании лика Земли. Существуют также типы лавинной биогенной седиментации (апвеллинги, коралловые рифы и др.), хемогенной (образование эвапоритов), вулканогенной (активные окраины) [Лисицын, 1988].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Методы количественного изучения осадочного вещества быстро развиваются и в настоящее время используют: 1) данные о концентрации рассеянных форм осадочного вещества — взвеси в толще вод; 2) данные о потоках осадочного вещества, определенных с помощью седиментационных ловушек, установленных в водной толще на разных глубинах (инситуные наблюдения за потоками вещества), или результаты исследования потоков изотопными методами (^{234}Th , ^7Be и др.); 3) определения скоростей седиментации донных осадков; 4) сведения об абсолютных массах или скоростях их накопления (захоронения); 5) данные о распределении мощностей осадочных отложений, полученные с помощью геофизики (в основном сейсмические исследования); 6) то же, на основе бурения; 7) данные о балансе распределения объемов и масс осадочного вещества.

Эти исследования, быстро развивающиеся за последние десятилетия, к сожалению, обычно проводятся разрозненно для различных регионов Мирового океана. При их обобщении уже сейчас можно получить первые представления о реальных закономерностях количественного распределения осадочного вещества на дне водоемов планеты. Полученные данные, естественно, дополняются изучением вещественного состава, типов осадочных образований, полезных ископаемых.

Материал для этого обобщения накапливался на протяжении почти 35 лет при выполнении работ в разных частях морей и океанов с изучением взвеси, потоков, скоростей седиментации, мощностей, масс и объемов вещества [Лисицын, 1974, 1978, 1988; и др.].

Специальное внимание уделялось поставке терригенного — важнейшего по массе — осадочного вещества с континентов реками. Для получения данных по единой системе Институтом океанологии РАН проводились многочисленные экспедиции в устьевые области крупнейших рек СССР [Лисицын, Гордеев, 1974; Морозов и др., 1974; Демина и др., 1978; Гордеев, 1983, 2004], а также крупная океанографическая экспедиция на Амазонку [Монин, Гордеев, 1988], в устьевые области рек Лена, Енисей, Обь, Печора, Северная Двина, других рек Азии и Европы, использовались и другие работы отечественных [Конторович А.Э., 1968] и зарубежных ученых [Milliman, Meade, 1983] в областях лавинной седиментации других крупнейших рек Мира, а также проводились совместные международные экспедиции [Лисицын, Виноградов, 1994].

Данные о среднем составе взвеси рек Мира, полученные А.П. Лисицыным и В.В. Гордеевым [1974], подтвердились независимыми исследованиями французских геологов [Martin, Meybeck, 1979]. Удалось показать на конкретных примерах из разных климатических зон, что на границе река—море осаждается подавляющая часть взвеси (явление маргинального фильтра), и что здесь преобладание взвешенных форм элементов (типичное для речной воды) за соленосным барьером сменяется таковым растворенных форм элементов (типичных для открытого океана) [Биогеохимия..., 1983; Лисицын, 1994].

За пределами устьев рек в широких масштабах проводилось количественное изучение осадочного вещества не только во взвеси в морской воде, но также и аэрозольного и биогенного материала, а в Антарктике и Арктике — криозольного [Лисицын, 1974, 1978; Шевченко, 2006]. На серии разрезов, уходящих в пелагиаль от устьев крупнейших рек (или выводных ледников), удалось показать закономерности распределения этого осадочного вещества, сравнить его с распределением взвеси в речной воде, аэрозолей, криозолей.

Эти исследования рассеянного осадочного вещества на стадии его подготовки и переноса (в речной и морской взвеси) дополнены анализом многих тысяч колонок и кернов бурения для определения скоростей современной седиментации, а также абсолютных масс осадочного вещества в целом и его компонентов. Впервые, таким образом, появилась возможность прямых количественных сопоставлений концентраций осадочного вещества на стадиях его подготовки, транспортировки и аккумуляции.

Количественные исследования осадочного вещества для еще больших отрезков времени выполнены по кернам бурения судна «Гломар Челленджер» (более 1000 точек в разных частях океана) в сопоставлении с данными геофизики (сейсмика), что позволяет сравнить современные скорости седиментации с древними (до 150—160 млн лет) [Геологическая история..., 1980]. При таком подходе появляется уверенность в том, что не будут упущены какие-то важные черты развития процессов во времени.

В масштабе пространства — исследования проводились практически для всего Мирового океана и потому (несмотря на неполноту данных по некоторым разделам) — фактический материал для выводов представляется достаточно надежным.

Современные методы изучения концентраций осадочного вещества в водах и на дне позволяют характеризовать процессы также и в разных временных масштабах — от почти моментальной фотогра-

фии (по распределению взвеси в воде в период работ — дни и недели) до более длительных интервалов (месяцы и годы) — при изучении потоков с помощью седиментационных ловушек, и еще более значительных — по скоростям седиментации и абсолютным массам донных осадков (сотни—тысячи лет). Наконец, для геологических масштабов времени (сотни тысяч—миллионы лет) — по мощностям и составу осадочной толщи, определенным по данным изучения кернов бурения и геофизики (миллионы лет).

Итак, фактический материал уже сейчас позволяет судить о закономерностях быстрого и сверхбыстрого осадконакопления как в пространстве Мирового океана, так и во времени — для последних 160 млн лет.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Лавинной (быстрой и сверхбыстрой) седиментацией называются особые процессы, возникающие при содержании взвеси в воде более 10 мг/л, скорости седиментации более 100 мм/1000 лет, абсолютных массах (скоростях накопления осадочного вещества) более 5 г/см²/1000 лет. Высокие скорости осадконакопления, как отмечалось, приводят не только к появлению особых свойств осадочных образований (вещественный и гранулометрический состав, влажность, текучесть и пластичность осадков, текстуры и др.), но также к изостатическому прогибанию земной коры, что, в свою очередь, способствует возникновению в осадочных бассейнах лавинной седиментации особых термобарических условий, благоприятных для образования нефти и газа («нефтегазовое окно»). Сам термин *лавинная седиментация*, как видим, предусматривает сочетание ряда критериев, а не одного взятого в отдельности. Так, кратковременное накопление материала в небольшом бассейне без изостатического прогибания дна не является лавинной седиментацией, поскольку эти высокие скорости оказываются эфемерными в масштабе времени, и там скопление осадочного материала не фиксируется в геологическом разрезе.

В конечном водоеме стока возникают не только широкие ореолы рассеивания вещества близ устьев рек, но и отдельные дискретные осадочные бассейны, развивающиеся автономно. Разрывность бассейнов в пространстве дополняется еще их разрывностью во времени — ураганные темпы поступления осадочного вещества сменяются этапами замедления, перерывов и даже размыва уже накопившихся отложений.

Для того чтобы началось перемещение масс рыхлого вещества, подготовленного выветриванием, необходим перепад высот. Под действием гравитационных сил происходит — с помощью воды или в сухом состоянии — перемещение рыхлого материала с более высоких гипсометрических уровней на более низкие. Чем больше перепад высот, тем энергетически напряженнее процессы перемещения. Мировой океан — глобальное понижение поверхности планеты, и поэтому глобальная область аккумуляции. Средняя глубина океана составляет 3794 м, в то время как средняя высота суши +840 м, т.е. средний перепад высот составляет около 5 км (максимальный около 20 км). Этим определяется средний запас кинетической энергии.

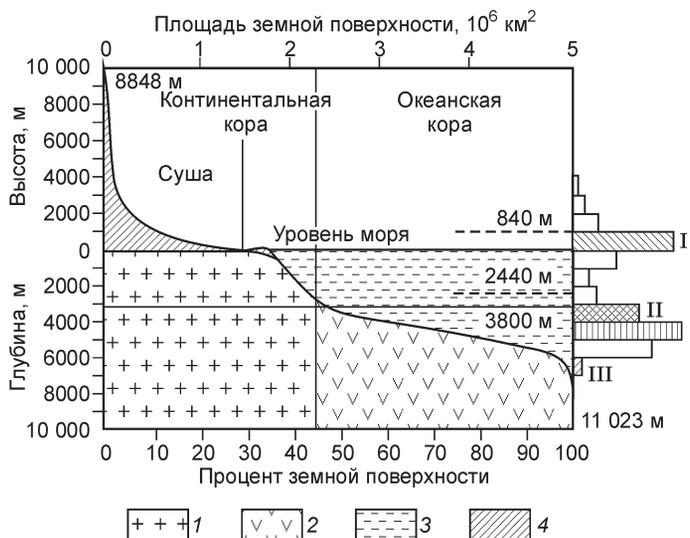
Главная часть вещества, переносимого потоками, обычно быстро собирается там, где теряется несущая сила потока — в области его перехода на равнину, т.е. в устьях рек, у основания материкового склона.

Из гипсографической кривой Земли следует (рис. 7), что таких переходов в глобальных масштабах существует три: 1) близ уровня моря, где речные потоки впадают в океан и теряют несущую силу; 2) у ос-

Рис. 7. Гипсографическая кривая Земли — относительные высоты и глубины, соотношение их площадей (справа).

1, 2 — области коры: 1 — континентального, 2 — океанского типа; 3 — толщина вод океана; 4 — главная по площади часть водосбора (0—840 м).

Перепады высот соответствуют запасам потенциальной энергии движения гравититов на дне морей и океанов (потенциальная энергия рельефа). Средняя высота суши, составляющей 29 % от поверхности Земли, — 870 м. Средняя глубина Мирового океана, занимающего 71 % поверхности Земли, — около 3800 м. Часть Земли, сложенная корой океанского типа, — около 55 %. Максимальный перепад глубин (максимум потенциальной энергии) — около 20 км (гора Джомолунгма—Марианская впадина). На глубины главной области разгона гравититов (200—3000 м) приходится около 11 % поверхности Земли, на область их главного распространения (3000—5000 м) — около 37 %. Глубины более 6 тыс. м (третий высотный уровень лавинной седиментации) распространены на 1 % поверхности Земли.



нования континентального склона, где потоки, зародившиеся на склоне, выходят на равнину; 3) в глубоководных желобах — максимальных понижениях дна океана. Это соответственно первый, второй и третий уровни лавинной седиментации. Для условий сохранности осадочного вещества в геологическом разрезе очень важно то, что на материковом склоне проходит граница между двумя разными типами коры — океанским и континентальным (приблизительно по изобате 3000—3500 м). Часть материала, отложившегося на континентальной коре, связана с развитием океанской коры, которое для коры континентальной и океанской идет по своим законам.

Площадь континентов в геологическом понимании (по типу коры) (29 и 46 %) в 1.5 раза больше, чем в географическом (по границе суши и океана). Для третьего глобального уровня — дно глубоководных желобов — максимальная глубина составляет 11 023 м. Максимальный перепад высот в пределах планеты составляет от +8848 м (гора Эверест) до 11 023 м (Марианская впадина), т.е. около 20 км! Это верхний предел потенциальной энергии для гравитационных перемещений на планете.

При дальнейшем изложении концентрации взвеси в воде даны в мг/л, а потоки осадочного вещества в единицах Fu (flux unit) — 1 г/см²/1000 лет (или 1 мг/см²/год). Для донных осадков пелагических частей океана используется единица скорости седиментации Б (единица Бубнова) — 1 мм/1000 лет. Скорости накопления осадочного вещества (в целом или его компонентов), т.е. абсолютные массы, выражаются через единицы Страхова (St) (1 г/см²/1000 лет), предложенные автором [Лисицын, 1974].

ПЕРВЫЙ ГЛОБАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ — ЭСТУАРИИ И ДЕЛЬТЫ РЕК МИРА

Прямые доказательства быстрого осаждения осадочного вещества на границе река—море (первый глобальный уровень лавинной седиментации) могут быть получены при сопоставлении концентраций и потоков взвеси в речной воде с концентрацией и потоками за пределами барьера река—море. Как видно из табл. 1—3, среднее содержание взвеси в реках находится обычно в пределах от 100 до 10 000 мг/л и более, а в море за пределами барьера — от 0.1 до 1.0 мг/л. Таким образом, на барьере происходит снижение содержания осадочного вещества в воде в 100—1000 и более раз, т.е. идет лавинное осаждение речной взвеси, которая за пределы зоны смешения может проникать только в ничтожных количествах. Это же подтверждается при изучении скоростей седиментации, абсолютных масс и мощности осадков. Интенсивность поставки вещества в зоны смешения определяется, как известно, сочетанием ряда факторов (средняя высота водосборного бассейна, интенсивность выветривания, особенности геологии и климата, растительность) [Лисицын, 1978, 1988, 2004а,б].

Из суммарного поступления осадочного материала с суши (около 18 млрд т в год) около 75 % (14.4 млрд т) приходится на реки Азии, что определяется высотой поверхности их водосборов и интенсивностью выветривания (рис. 8). Средняя высота материка Азии составляет +960 м, т.е. максимальная для материков (кроме Антарктиды), чем и обеспечивается значительная живая сила потоков. Интенсивность эрозии усиливается тропическим и экваториальным климатом с высокими скоростями химического выветривания [Лисицын, 1973]. В экваториальной зоне, а также близ горных сооружений 1 км² водосбора дает в год до 500—1000 т и более осадочного материала, а в холодных частях умеренных зон — менее 5 т/км², т.е. в 200 раз меньше. Вероятность лавинной седиментации при прочих равных условиях больше всего в экваториальных зонах и близ крупных горных сооружений.

Таблица 1. Среднее содержание взвешенного осадочного материала в водах рек, морей и океанов [Лисицын, 1974]

Реки, моря, океаны	Содержание, мг/л
Реки тропической зоны:	Среднее >1000
Хуанхэ	14 975
Демерара	3000—10 000
Инд	2448
Ганг	1200
Нил	1842
Реки умеренной зоны:	Среднее 30—40
Северная Двина	41.3
Обь	39.5
Лена	30.1
Енисей	21.6
Реки мира	Среднее 460
Шельфы океанов	Среднее 1—10
Пелагиаль океанов	Среднее 0.1—1.0

Таблица 2. Полнота осаждения речных взвесей в маргинальных фильтрах (МФ) на границе река—море

Река	Осаждение в МФ*
Амазонка	95
Миссисипи	90
Св. Лаврентия	93
Заир	95
Шельда	92
Хуанхэ	95
Реки Арктики (среднее)	93—95
Реки бассейнов Черного и Азовского морей	83
Среднее для МФ рек мира	93

* В % от содержания взвеси в речной воде до зоны смешения.

Из рек России максимальную мутность (48 000 мг/л) имеет р. Калаус, которая дренирует рыхлые отложения. Для горных рек Кавказа характерны значения мутности 10 000—25 000 мг/л.

На примере рек России, занимающей около 1/5 поверхности Земли, удается показать, что и в холодных, и в умеренных зонах мутность рек тесно связана с климатической зональностью. Минимальная для зон мутность характерна для рек тундры и тайги — менее 50 мг/л, для лесостепных зон — 50—150 мг/л, для степных — 150—5000 мг/л. Еще выше она в районах с резкими перепадами рельефа (горы и плоскогорья) — более 500 мг/л.

Наряду с зональными факторами (климатическая и вертикальная зональность), большое значение имеют и азональные (геологическое строение водосборов, распахка, устойчивость пород к выветриванию и др.). Особенно высокие, аномальные для соответствующих зон, значения мутности типичны для рек, в водосборах которых распространены лессы и другие рыхлые осадочные отложения (Китай, Средняя Азия, США, некоторые районы Сев. Кавказа). При среднем содержании взвеси в реках Мира около 500 мг/л среднее значение для рек Юго-Восточной Азии составляет 1280 мг/л [Гордеев, 1983].

Прямые наблюдения лавинного отложения вещества в устьях многих рек подтверждаются не только данными по взвеси, но и результатами прямого (инситу) изучения вертикальных потоков осадочного вещества в устьях и дельтах (с помощью седиментационных ловушек), значениями скорости седиментации, мощностью осадочных отложений [Лисицын, 1988, 2004а,б; и др.].

Цифры скорости седиментации в дельтах, заливах и фьордах на границе река—море не только достигают приведенных выше лавинных значений (более 100 Б), но и намного превышают их. Например, в устье р. Хуанхэ скорости достигают 52 800 Б, а значения более 1000 Б (соответствующие сверхбыстрому осадконакоплению) распространены очень широко. В пелагиале океанов обычны скорости 1—3 и 3—10 Б [Лисицын, 1974, 1978].

Примечательно то, что в зоне смешения речных и морских вод и содержание взвеси, и скорости седиментации значительно выше, чем в реке, и тем более по морскую сторону от зоны смешения! Определяется это комплексом физических, физико-химических и биологических условий.

Осаждение взвеси здесь связано не только со снижением несущей силы потока при его впадении в море за счет подпруживания, но также и со сменой физико-химической обстановки, которую можно количественно выразить через изменение солёности (ионной силы раствора — морской воды).

В пресноводной части эстуария (солёность менее 1 ‰) характерны обычные для реки содержания взвеси, причем на долю взвешенных форм элементов приходится 65—95 % от их общего содержания. Типично высокое содержание гуминовых и фульвокислот, соединений железа [Лисицын, 1994, 2001а,б].

В солоновато-водной части (солёность от 1 до 20 ‰) происходит выпадение главной части речной взвеси, перезарядка ее коллоидных частиц с выпадением флоккул глинистых минералов, гуминовых и фульвокислот, окислов железа (80—95 %). Именно здесь возникает уникальный участок, где концентрация взвеси намного выше, чем в реке, — так называемая «киловая пробка», которая чаще всего возникает в интервале солёности от 2 до 7 ‰. В процессе флокуляции гуминов и железа сорбцией из водных растворов захватывается много металлов (до 50—90 %), и потому здесь же располагается «элементоорганическая пробка». Закономерности выпадения металлов определяются их сродством с гуминовыми кислотами, железом и глинистыми минералами.

Наконец, еще мористее после осветления вод коагуляцией в пределах солёной (более 20—30 ‰) части эстуария возникает еще одна область высоких концентраций взвеси, связанная с планктоном — «биологическая пробка» с пышным развитием фито- и зоопланктона, в том числе организмов фильтраторов, которые способны отфильтровывать весь объем прибрежных вод за несколько дней. Границы «пробок» смещаются в зависимости от сезона, приливов и других факторов. В области «биологической пробки» происходит массовый перевод фитопланктоном растворенных форм элементов в протоплазму, ткани и панцири, образование органического вещества — в будущем источника нефти и газа. Здесь же в огромных масштабах идет биофильтрация взвеси зоопланктоном и бентосом, т.е. связывание тонких частиц и флоккул в крупные пеллеты. Это природные микроконтейнеры с оболочками, сохраняющие это органическое вещество!

Устьевые зоны — это не только области выпадения подавляющей части терригенной взвеси, принесенной реками, но также мобилизации органики, перевода из раствора во взвесь значительной (до 40—60 %) части растворенных форм элементов речной воды. Иначе говоря, это уникальная для всех осадочных процессов область!

Таблица 3. Скорости седиментации в депоцентрах крупнейших рек

Река	Скорость, мм/1000 лет
Миссисипи	10 000
Пария (р. Ориноко)	10 000
Менам	>30 000
Нил	1000—10 000
Иравади	>2000
Годавари	1000—3000
Потомак	1600—18 000
Рона	5000—6000
Лена	2000
Обь	1700—2600
Енисей	2400—4900

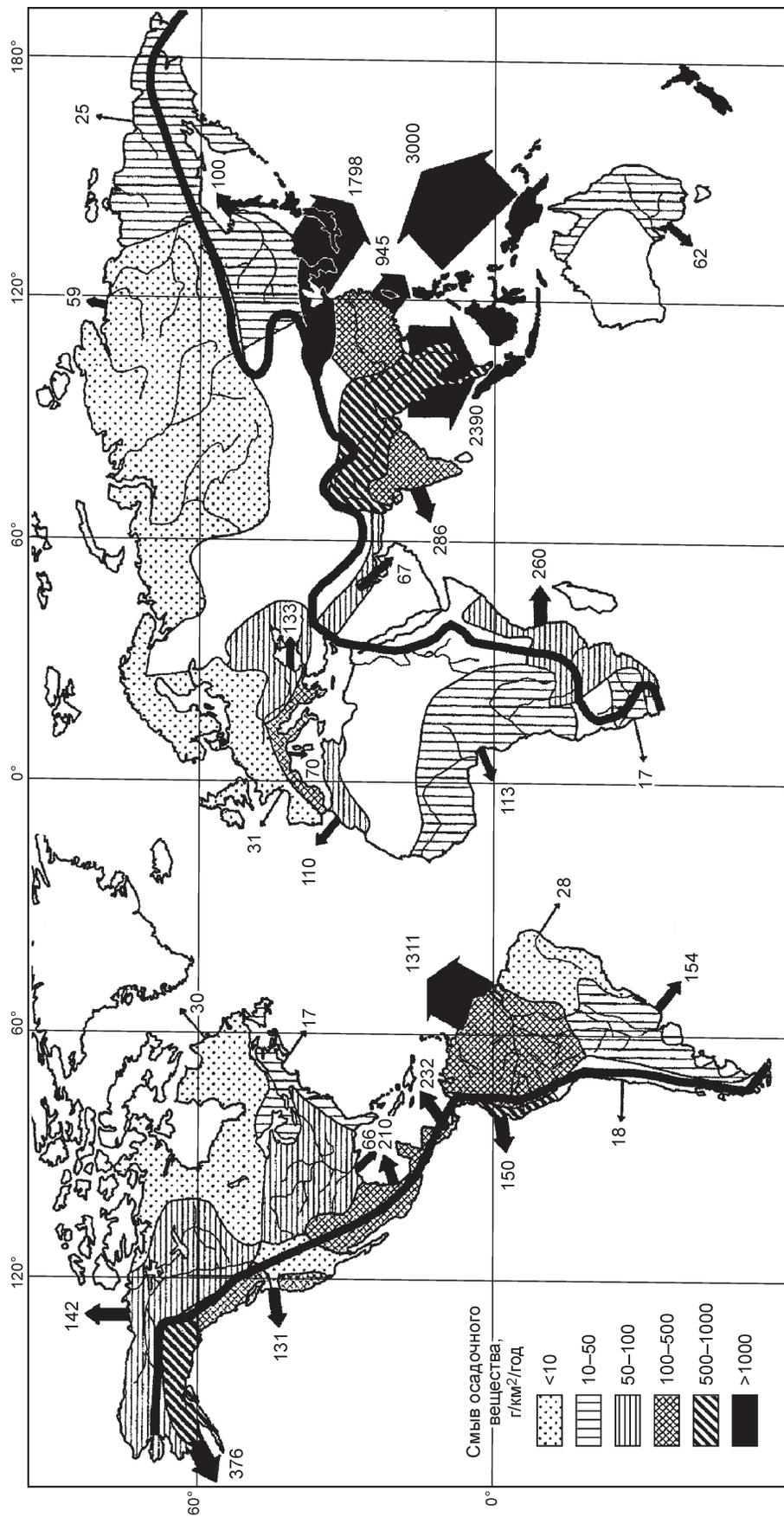


Рис. 8. Распределение стока осадочного вещества рек Мира и глобальный водораздел континентов [Milliman, Meade, 1983, с изменениями].

Размеры стрелок соответствуют поступлению осадочного вещества в млн т/год (шифры около стрелок). Глобальный центр поставки — Юго-Восточная Азия и острова, т.е. восточная часть Альпийско-Гималайской зоны, область коллизии Индийской и Евразийской плит. Жирная линия — глобальный водораздел.

Смыв осадочного вещества с 1 км² водосбора (модуль смыва) — поток осадочного вещества с суши из водосборов в океан через маргинальный фильтр, т.е. области лавинной седиментации первого уровня, забирающие около 90 % речного осадочного вещества.

Массовая флокуляция речной взвеси и ее быстрое выпадение могут приводить к быстрому и сверхбыстрому осадконакоплению, если только осадочный материал под действием волн и приливов не будет вынесен из зоны смешения, как это наблюдается, например, в устье р. Амазонки. Сильными течениями, направленными вдоль берега, выпадающая взвесь из устья Амазонки в значительных количествах уносится на север от устья, образуя на шельфе поток взвеси и периодически перемещающиеся вдоль берега иловые банки. Рассеивание осадочного вещества на близлежащие участки идет и в эстуариях, подверженных сильным волнениям, воздействию течений и приливно-отливным колебаниям уровня.

Таким образом, не всегда осадочный материал, осаждаемый в устье, имеет возможность здесь же концентрироваться: под действием волн и приливов он или вытягивается вдоль берега, или сбрасывается вниз по склону (на узких шельфах), попадая в область лавинной седиментации второго уровня. В природной действительности существует множество переходов между этими основными типами распределения вещества в устьях. И при всем том, независимо от типа устья (дельты, эстуарии, заливы, фьорды и др.), зоны смешения речных и морских вод — это главная фабрика по концентрации речного осадочного материала на Земле, где вещество, подготовленное на огромных площадях водосбора, мобилизуется в форме скоплений осадочного материала на небольших по площади участках. Именно здесь происходит выпадение органического вещества не только из речной взвеси, но также массовый перевод органики из растворенных форм во взвесь коагуляцией и сорбцией. Здесь же максимум продуцирования свежей органики фитопланктоном.

Итак, возникновение крупных скоплений осадочного вещества на первом уровне возможно при сочетании значительных масштабов его поставки (как во взвеси, так и в растворах) и незначительного удаления этого вещества из зоны седиментации (соотношения интенсивности выпадения осадков и уноса осаждающегося материала под воздействием энергии волн и приливов) [Deltaic..., 1970]. К этому необходимо добавить еще и изменения уровня океана во времени, которые в значительной мере определяют сохранность осадочных тел первого уровня.

Рассмотрим несколько дельт, наиболее значительных по твердому стоку рек (см. табл. 1—3).

Основная часть поверхности Земли дренируется 12 реками-гигантами со стоком взвеси каждой более 100 млн т в год (из них 2 реки-супергиганты с поставкой более 1000 млн т в год). Таким образом, около 6 млрд т взвешенного материала концентрируется в 12 точках земной поверхности, причем именно здесь накапливается более 30 % от всего терригенного вещества первого уровня лавинной седиментации!

Характерна зональная приуроченность этих главных бассейнов лавинной седиментации: чаще всего они наблюдаются в гумидных зонах или на границе гумидных и аридных зон, но не встречаются в ледовых и аридных. Депоцентры современной лавинной седиментации Земли расположены у южных берегов Азии, они протягиваются от Индии до Китая. Понятно, что закономерности осадкообразования именно в таких местах заслуживают детального изучения в первую очередь.

Реки Ганг и Брахмапутра образуют единую дельту — крупнейшую осадочную систему Мира. Они поставляют по разным данным от 1670 до 2177 млн т взвеси в год, т.е. более 2/3 речного стока в Индийский океан. Это больше, чем поставляют все реки водосборного бассейна Атлантики. Высока также мутность вод этих рек, дренирующих Гималаи, — до 1700 мг/л, т.е. в 2—3 раза выше средней мутности рек Мира. Приливо-отливные колебания уровня достигают в устье 7 м, что приводит к выносу значительной части материала от барьера река—море в Бенгальский залив. Здесь образуется гигантское подводное продолжение дельты — конус длиной около 3000 км и шириной около 1000 км. Общая его площадь около 2 млн км², что в 25 раз больше площади надводной части дельты. При мощности до 16—20 км объем осадочных образований достигает 5 млн км³, что в 10 раз больше объема всего современного Черного моря (рис. 9, 10). Это далеко не уникальный по масштабам бассейн лавинной седиментации: объем древнего Западно-Сибирского нефтегазового бассейна равен около 7 млн км³.

Сейчас главная часть осадочного вещества накапливается близ устья этих рек (в пределах изопахиты 5 км), что подтверждается и нашими исследованиями взвеси на разрезах, уходящих от устья, и геофизическими данными. Концентрация взвеси уже близ устья снижается до 1.0—2.5 мг/л, т.е. сравнительно с речными водами в 700—2000 раз, хотя вынос небольших количеств взвеси прослеживается в толще вод залива почти до экватора [Лисицын, 1988].

Глубоководное бурение в подводном конусе Ганг—Брахмапутра (максимальная длина керна 2.5 км, т.е. пройдена только 1/6 часть толщи осадков) показало, что формирование его началось еще до столкновения субконтинента Индии с Азиатской плитой, а после столкновения (около 55 млн лет назад) — в условиях воздымания Гималаев, которые являются источником грандиозных количеств осадочного вещества [Zeitler et al., 1980]. Подводные конусы Ганг—Брахмапутра и Инд — это коррелятные толщи по отношению к тектонически активным вздымающимся и быстро срезаемым эрозией Гималаям (модуль смыва 1500—3000 т/км² и больше). Этот гигантский осадочный бассейн (Бенгальский залив) на дне не испытывал воздымания и на протяжении всей своей истории находился ниже уровня океана. Даже при

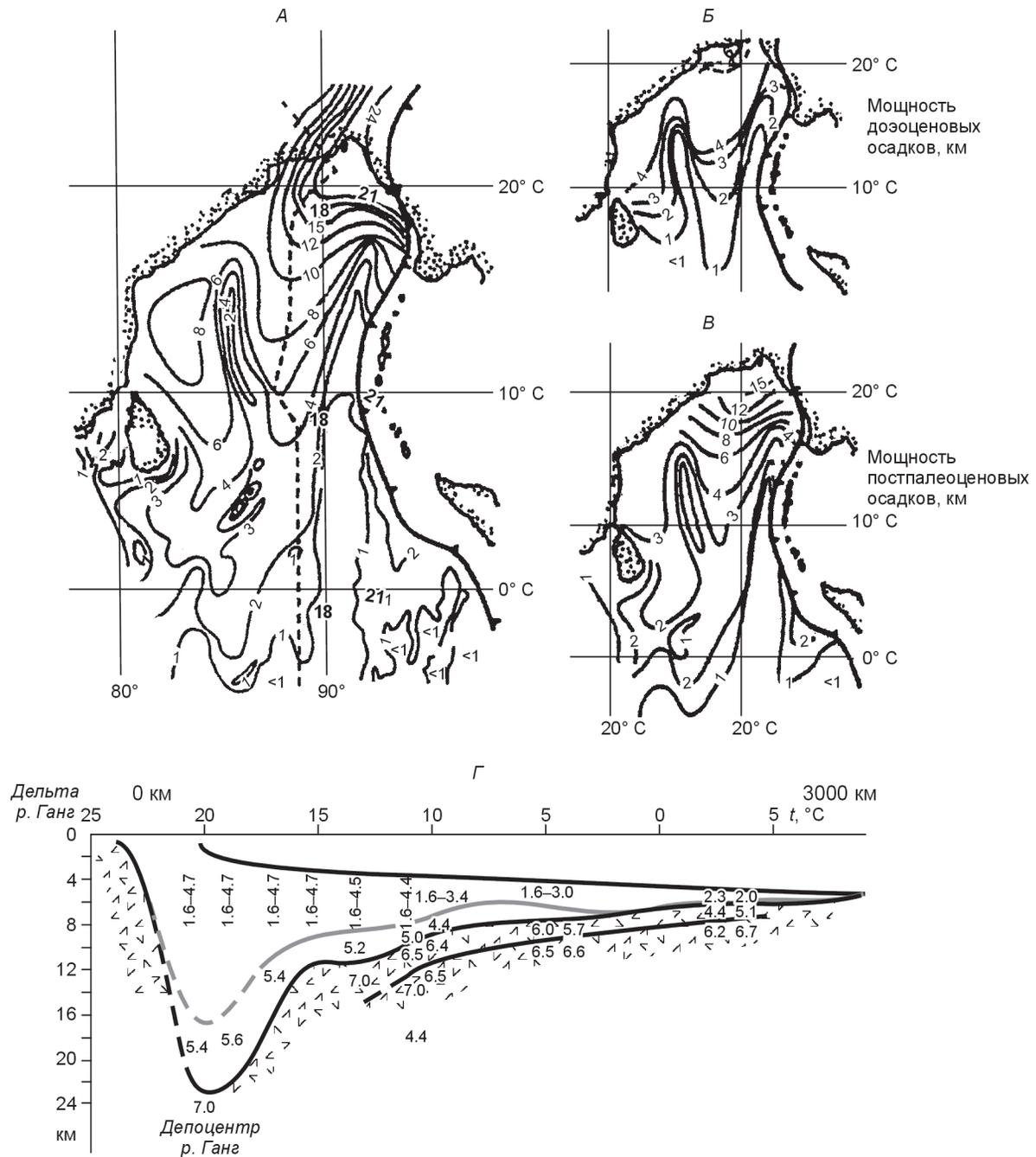


Рис. 9. Подводный конус выноса рек Ганг и Брахмапутра — крупнейшая на Земле осадочная система с мощностью осадков до 21 км, возрастом около 50 млн лет. Данные геофизических исследований и глубоководного бурения (рейсы 116, 121) [Curry et al., 2003].

A — Бенгальский залив и Бенгальский бассейн. Пунктир — положение разреза (см. *Г*); *Б* — мощность доэоценовых отложений, км (до столкновения плит). Средняя скорость седиментации 10 см/1000 лет (100 Б); *В* — мощность постпалеоценовых отложений, км (после коллизии). Средняя скорость седиментации 56 см/1000 лет (560 Б); Мощность осадочной толщи (изопахиты, км). *Г* — генеральный разрез север—юг (положение на разрезе *A*) длиной около 3 тыс. км. Цифры на рисунке — скорости звука по данным сейсмоки, км/с (выделенные цифры — максимальные из известных значений мощности осадков). Гигантский конус выноса связан с коллизией Индийской плиты (субконтинента) и Европейской плиты (Гималаи и Тибетская плита). Конус оказывается на глубине более 5 тыс. м. Подводные Антигималаи.

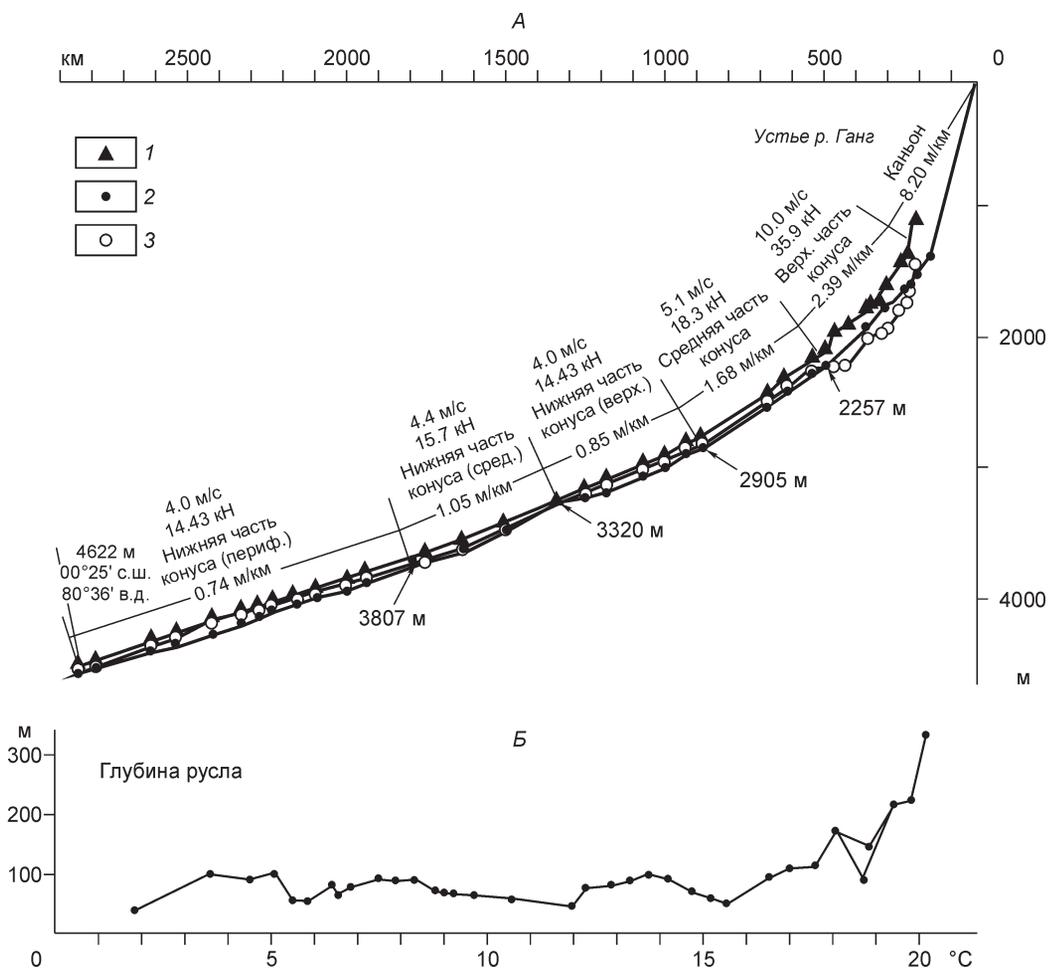


Рис. 10. Продольный разрез подводного русла р. Ганг длиной около 3 тыс. км, изменение глубины и основных параметров [Curragy et al., 2003].

А — продольный профиль от устья р. Ганг до периферии конуса. Показаны основные участки конуса и градиенты изменения глубины (от 8.2 м/км в каньоне до 2.39 м/км в верхней части конуса с постепенным выполаживанием до 0.74 м/км на периферии конуса). Цифры выше — скорость движения потоков гравититов, м/с (верхняя цифра) и в узлах (нижняя). Скорость прохождения потока меняется в зависимости от уклона и реологических свойств потока от 10 м/с в верхней части конуса до 4 м/с — в нижней. Каньон и верхняя часть конуса — область разгона потока, нижняя часть — область торможения (до глубины 4622 м). Максимальная скорость потока более 36 км/ч, минимальная — 14—15 км/ч. 1—3 — данные разных экспедиций.

Б — изменение глубины вреза подводного русла от устья (более 300 м) до нижней части конуса (менее 100 м).

глубине Бенгальского залива до 5258 м накопившиеся осадки должны были бы трижды заполнить его, если бы не изостатическое прогибание коры, подстилающей осадочный бассейн!

Объем подводного конуса выноса рек Ганг и Брахмапутра определен в $5 \cdot 10^6$ км³. Подсчеты показывают, что для образования такого гигантского осадочного тела нужно несколько раз полностью размыть и вынести в океан всю горную систему Гималаев. Вероятно, это случилось бы, если бы не непрерывный подъем Гималаев со средней скоростью от 100 до 750 мм/тыс. лет [Zeitler et al., 1980].

Сходные данные получены также для другой части Альпийско-Гималайской зоны — для Альп. На основе методов геобатиметрии удалось установить, что эрозия этой горной системы достигает 25—40 км. Скорость эрозии за это же время составляет 100—1000 мм/1000 лет, т.е. близка скорости поднятия Гималаев.

Конусы выноса рек, сформировавшиеся за счет размыва Альп (реки Рона, Дунай, По и более мелкие), имеют объемы, многократно превышающие объем вещества при эрозии Альп за 30 млн лет [Clark, Jager, 1969; England, 1981]. На дне возникает как бы антиальпийско-гималайская зона гигантских скоплений осадочного вещества.

Сходная картина наблюдается и близ устья другой крупной реки Юго-Восточной Азии — *р. Иравати*. Мутность ее вод составляет 600—700 мг/л, а за пределами зоны смешения быстро падает до 1 мг/л и меньше.

Второй по значению осадочной системой современности является *р. Хуанхэ*, которая имеет сравнительно небольшой водосборный бассейн, сложенный лессами, что приводит к быстрому размыву, колоссальным значениям мутности (до 15 000 мг/л при средней для рек Мира 500 мг/л), т.е. здесь теряется граница между плотной взвесью и рыхлыми осадками. Для сравнения среднее содержание взвеси в устьях рек Сибири — 30—50 мг/л.

Желтое море представляет собой огромную зону смешения, постоянный депоцентр, где скапливается осадочное вещество рек Китая и Кореи. Свое название море получило из-за очень высокого содержания взвешенных частиц (более 100 мг/л летом, более 500 мг/л зимой), в значительной части продуктов размыва лессов на прилегающей суше [Lee, Chough, 1989]. Скорость седиментации в заливе Бохай составляет в среднем около 5000 Б, т.е. это область сверхвысоких скоростей седиментации. Здесь откладывается около 70 % взвешенного материала *р. Хуанхэ*. Современного уровня воды залива достигли около 5 тыс. лет назад, а до этого залив Бохай был сушей, воды реки впадали в море значительно южнее. На основании изучения взвеси показано, что за пределами залива воды движутся в общем направлении на юго-восток, огибая п-ов Шаньдун. Мутность падает до 5 мг/л, постепенно приближается к средней для океанов — 0.1—1.0 мг/л [Лисицын, 1988]. Поставка взвеси в устье реки столь значительна, что отмечается изменение положения устья — за последние 40 лет скорость выдвигания дельты колебалась от 1.5 до 6.0 км/год [Эстуарно-дельтовые системы..., 2007]. Скорости седиментации при выходе из залива Бохай быстро снижаются до 1000 Б и менее, т.е. сверхбыстрое осадконакопление к югу от этого полуострова сменяется быстрым.

Область лавинной седиментации *р. Хуанхэ* сливается на дне Желтого моря с областью лавинной седиментации *р. Янцзы*, которая выносит в устье 478 млн т взвеси в год. Скорость седиментации в устье этой реки достигает колоссальных значений — 300 000 Б. Поэтому даже в центральных частях Желтого моря сохраняются лавинные скорости 3000—4000 Б. Около половины взвеси, поступающей из *р. Янцзы*, откладывается севернее 30° с.ш., причем скорость седиментации здесь достигает 528 000 Б.

Амазонка — крупнейшая по водному стоку река Мира, выносит в устье по разным данным от 498 до 900 млн т взвеси в год. Мутность вод этой реки в сотни раз ниже, чем рек Китая и Юго-Восточной Азии, что связано с влиянием лесной растительности, закрепляющей рыхлые отложения и продукты выветривания. Новые данные по осадконакоплению в устье Амазонки получены американскими и российскими учеными [Монин, Гордеев, 1988; Milliman, Boyle, 1975; Meade et al., 1979; Milliman, 1979]. Если среднее содержание взвеси в речных водах составляет 156 мг/л, то за пределами барьера река—море оно снижается в 100—150 раз. Как уже отмечалось, часть выпадающей в зоне смешения взвеси перемещается на запад вдоль берегов до устья *р. Ориноко*. С зоной смешения (интервал солености от 2 до 10 ‰) связаны максимальные скорости седиментации — около 1700 Б [Gibbs, 1977]. Именно здесь располагается современный депоцентр.

Поступления осадочного материала в подводный конус Амазонки сейчас не отмечается, его каньоны затянуты осадками, как и для конусов рек Ганг и Инд, а также многих других рек, что отвечает современному высокому стоянию уровня океана.

Мощность осадочных отложений в дельте и конусе Амазонки превышает 10 км, а скорость седиментации за последние 2.2 млн лет колебалась от 50 до 1150 Б, ложе под воздействием изостатической нагрузки прогнулось.

Сходные данные о распределении взвеси, потоках осадочного вещества в толще вод, скоростях современного и древнего осадкообразования на границе река—море и мощности по материалам геофизики и бурения позволяют сделать общие выводы.

1. В речных водах главная форма существования элементов взвешенная, для элементов-гидролизатов она составляет 97.5—99.9 %. Только щелочные и щелочно-земельные элементы и органика выносятся реками в основном в виде растворов.

2. На границе река—море выпадает на ограниченном по площади участке до 70—95 % от содержащейся в речных водах взвеси, здесь же происходит флокуляция растворенной органики, железа, соосаждение из растворов многих элементов (сродственных органическому веществу и железу) [Лисицын, 1974, 1988; Sholkovitz, 1976, 1978], биологическая экстракция, т.е. не только осаждение взвеси, но и массовый перевод растворенных форм элементов в биогенную взвесь с ее последующим выпадением. Внешние границы этих маргинальных фильтров постепенные, во многом определяются течениями, волнами и др.

3. Накопление осадочного вещества происходит с лавинными скоростями, причем вещества рыхлого, обводненного, и что особенно важно, богатого органикой. Лавинная седиментация в маргинальных фильтрах крупных рек сопровождается прогибанием земной коры под массой огромных скоплений осадочного вещества.

4. Как показывают бурение в дельтах и данные сейсмостратиграфии, для лавинной седиментации первого уровня характерны многочисленные перерывы и несогласия [Кунин, 1983; Vail et al., 1977; Vail, Hardenbol, 1979; Weimer, 1990]. Складывается впечатление, что отложения периодически как бы среза-

лись гигантским «бульдозером» и удалялись из дельт. Таким образом, главная по объему часть осадочного вещества не сохранялась в толщах дельтовых отложений, несмотря на их огромные мощности, а была срезана и вынесена за пределы шельфа при изменениях уровня океана и таким образом перемещена ниже — на второй глобальный уровень лавинной седиментации.

ВТОРОЙ ГЛОБАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ЛАВИННОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ: ОСНОВАНИЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА

Континентальный склон океанов общей протяженностью около 350 тыс. км имеет перепад глубин от 130—200 м (бровка шельфа) до 4—5 км (основание склона). Ширина склона чаще всего составляет от 20 до 100 км, т.е. угол наклона нередко очень значителен (в среднем около 4°). Шельфы морей Российской Арктики достигают ширины в многие сотни километров.

Сочетание значительных перепадов глубин с крутизной склона обеспечивает огромный запас потенциальной энергии, энергии рельефа. Образуется как бы глобальный «трамплин», на котором сбрасываются вниз с шельфа и разгоняются до значительных скоростей (и при этом сильно обводняются) массы осадочного вещества. Массовый сброс вещества происходит периодически и одновременно для всего Мирового океана при понижениях его уровня, в чем убеждают многочисленные данные по сейсмостратиграфии, бурению и изучению отложений дельт [Vail et al., 1977; Vail, Hardenbol, 1979].

Склон гигантского обрыва, располагающегося по периферии океана, изрезан системами подводных каньонов и долин, здесь создается сложная подводная дренажная система, сходная с наземной [Shepard, 1955]. В отличие от дренажной системы суши она определяется переносом не воды, а масс «тяжелой воды» — осадочного вещества, в разной степени разбавленного водой. При небольших разбавлениях этого вещества осадки могут перемещаться вниз по склону как в виде цельных блоков (подводные обвалы), так и в форме оплывин (подводные оползни), суспензионных потоков и других гравититов.

Таким образом, здесь открыты все типы склоновых процессов, а также разветвленные подводные дренажные осадкосборные системы — канализованные потоки осадочного вещества в придонном слое. Областью питания — подготовки этого вещества — являются области, расположенные выше, т.е. маргинальные фильтры и осадки шельфа и верхних частей склона. Областью транспортировки (разгонные участки) — верхние и средние участки склона, а областью аккумуляции — торможения потоков — основание склона в полосе шириной около 500 км, а в ряде мест и более.

Замечательной особенностью осадочного процесса у основания склона являются его цикличность и зависимость от процессов на первом уровне (поскольку собственного осадочного вещества на склоне почти не возникает).

При высоком уровне стояния океана (например, на современном этапе, т.е. за последние 5 тыс. лет) главная часть осадочного вещества скапливается на первом уровне — в устьях рек. При снижении уровня происходит сброс этого рыхлого материала вниз по склону и его накопление у основания. В этом убеждает сопоставление данных по локализации крупных скоплений осадочного вещества у основания склона: они почти всегда приурочены к устьям крупных рек. О том же свидетельствует сопоставление стратиграфии дельтовых отложений и конусов выноса у основания склона, сравнительное изучение их вещественного состава (минеральная часть, в том числе биогенные, т.е. аутигенные минералы, органические остатки), исследование органического вещества и др. Отложения подводных конусов выноса у основания склона — это, таким образом, в основных своих чертах отложения верхнего глобального уровня лавинной седиментации (ЛС-1), измененные в процессе гравитационного переноса вниз по склону.

Реальный континентальный склон — это сложно расчлененная область, где крутые участки чередуются с пологими. При достижении каким-либо блоком рыхлого осадочного вещества критической массы, он начинает движение вниз по склону, чаще всего сначала в форме цельного блока — обвала или оползня. Затем при ускорении движения происходит его все большее перемешивание, разбавление водой, в движение вовлекаются и другие блоки, многие из них падают с крутых уступов, разбиваясь у основания уступа и еще более насыщаясь водой. Эти процессы гравитационной транспортировки осадочного вещества не приводят к существенным изменениям в составе осадочных отложений, так как нового вещества не прибавляется и не отнимается — петрофонд остается прежним, растет только обводненность осадочного вещества, меняется его текстура (в рамках, установленных на первом уровне). В процессах гравитационного перемещения выделяется определенная последовательность — сукцессия (от обвалов до легких турбидитов) [Лисицын, 1988; Lowe, 1976].

Первый этап осадочного процесса — подготовка осадочного вещества — связан в значительной мере с первым уровнем лавинной седиментации (ЛС-1), т.е. определяется климатической зональностью и другими факторами, указанными выше. Отметим, что на этом этапе дифференциация осадочного вещества очень слабая, поскольку перенос его идет не в форме отдельных частиц, а в разной степени обводненных отложений, стекающих или сползающих вниз по склонам. Количество подготовленного к

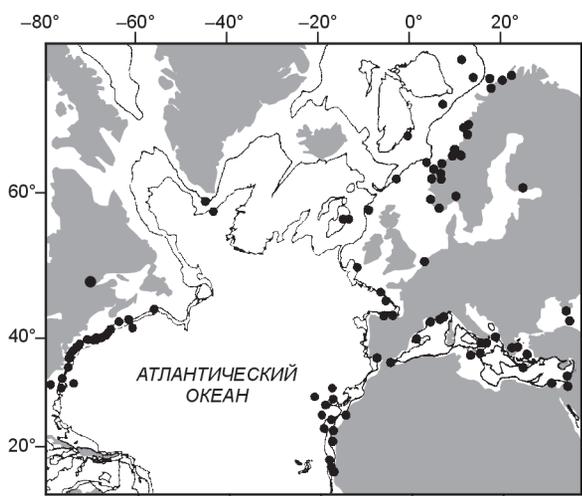


Рис. 11. Главные области распространения оползней в Северной Атлантике и в фьордах Норвегии и Канады.

По проекту COSTA изучено около 300 оползней (залитые кружки), из них рассмотрены для статистических сопоставлений около 260 оползней [Hühnerbach, Masson, 2004]. Все оползни в открытом океане начинаются с глубин 1160—1175 м, а в фьордах — с 15 м. Объем осадочных тел от 0.001 (в фьордах) до 3000 км³ на океанских склонах. Максимальная дальность смещения по склону — до 500—800 км. Проведены изобаты 1000 и 3000 м.

переносу материала и его состав, реологические свойства определяются процессами на верхнем уровне. Именно этим объясняется необычное для глубин высокое содержание органики.

Второй этап — транспортировка — протекает в двух формах: 1) диффузный перенос по склонам без

концентрации осадочного вещества в каналы (склоновый перенос); 2) концентрированный в русла (подводные долины, каньоны). Последняя (канализованная) форма имеет главное значение, в чем убеждает приуроченность верхних частей конусов выноса у основания склонов — фенев к нижним частям каньонов и долин. При канализованной (дренажной) системе переноса удается обычно выделять верхний осадкосборный веер, транспортирующую среднюю часть каньона и нижний рассеивающий веер (фен) [Nardin et al., 1974a; Normark, 1978; Vouma et al., 1985; Mayall et al., 2006].

Начальным этапом склонового перемещения являются оползни, которые при движении вниз по склону обводняются и трансформируются в другие, все более подвижные, гравититы или останавливаются.

Детальные исследования устойчивости континентальных склонов проводились по проекту COSTA (Continental Slope Stability). По единой методике описаны 260 оползней в северной части Атлантического океана (от 20° с.ш. до полярного круга) [Hühnerbach, Masson, 2004]. Изучены оползни не только восточных и западных окраин Атлантики, т.е. пассивных окраин, но также оползни в заливах, фьордах, на склонах вулканических островов (рис. 11—13). Существенным недостатком этих исследований было отсутствие реологических данных, в основном изучались геометрические показатели (длина, ширина, дальность смещения оползневых масс, в ряде случаев возраст и др.).

Эти и другие исследования дают возможность сделать первые выводы и статистику подводного оползневого процесса (табл. 4).

1. Длина оползневых тел изменяется от нескольких до сотен километров, а самые крупные имеют длину до 1100—1400 км (см. табл. 4).

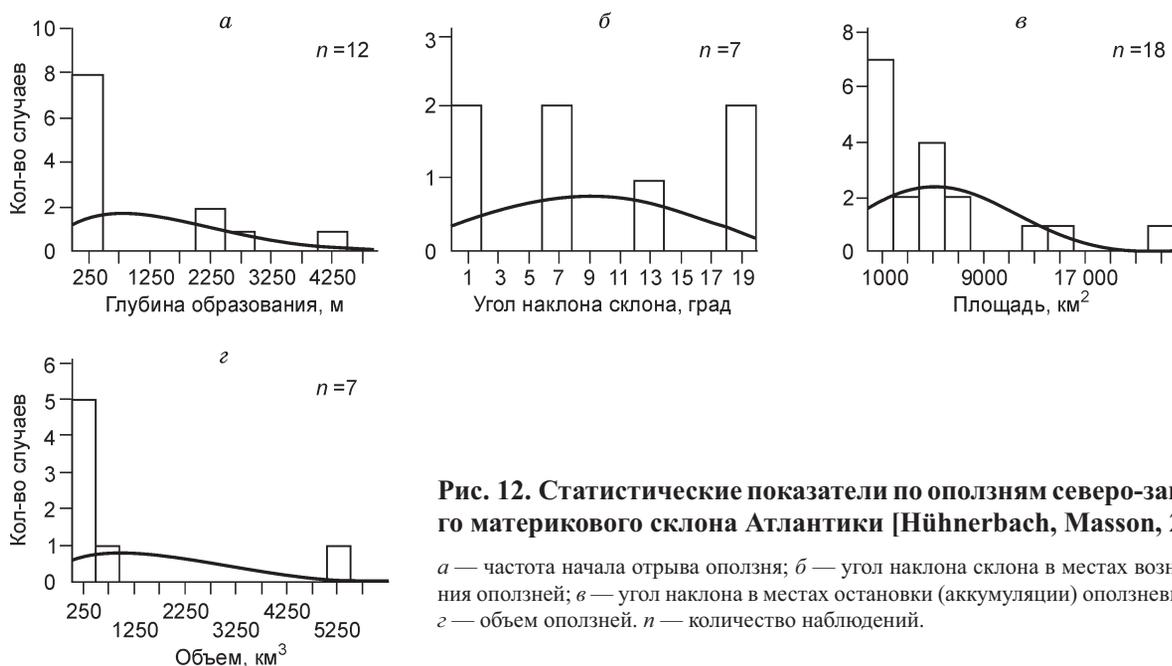


Рис. 12. Статистические показатели по оползням северо-западного материкового склона Атлантики [Hühnerbach, Masson, 2004].

а — частота начала отрыва оползня; *б* — угол наклона склона в местах возникновения оползней; *в* — угол наклона в местах остановки (аккумуляции) оползневых масс; *г* — объем оползней. *n* — количество наблюдений.

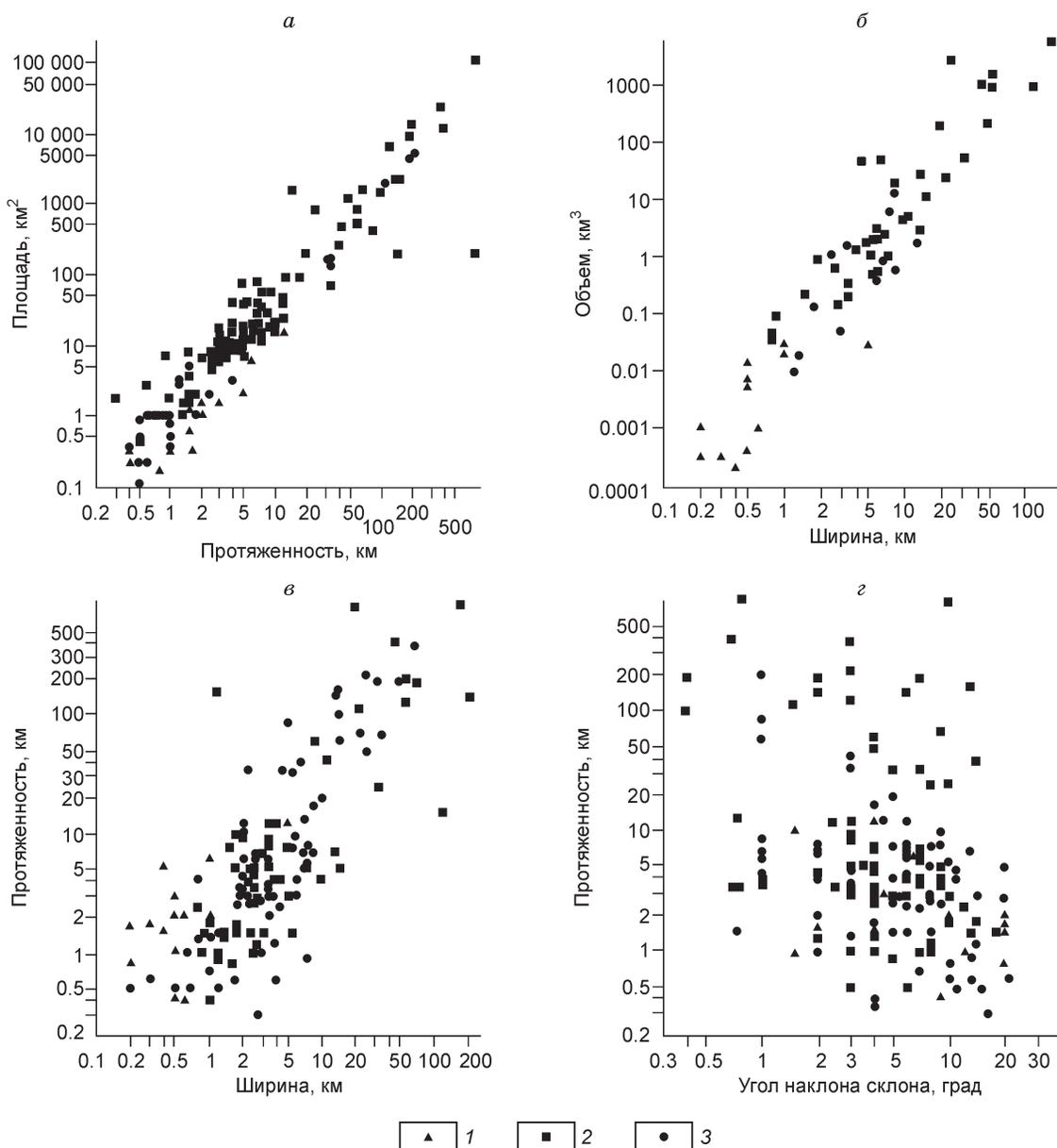


Рис. 13. Связь между основными параметрами осадочных тел оползней (двойная логарифмическая шкала) [Hühnerbach, Masson, 2004].

1 — фьорды Канады и Норвегии; 2 — восточный склон Атлантического океана; 3 — западный склон Атлантического океана.

2. Впечатляют также данные о площадях и объемах оползневых тел. Самые крупные имеют площадь более 100 тыс. км², большинство крупных — более 1 тыс. км², а средняя площадь оползней Восточной Атлантики — 1550 км² (среднее для 260 оползней).

3. Углы наклона в местах схода на склонах обычно от 1° и менее до 3—5°, в фьордах средние углы наклона схода — 5.5°.

4. Удивительно близкими оказались глубины отрыва — для всех изученных оползней Атлантики они установлены в интервале 1160—1175 м (для оползней в фьордах — всего 15 м). Выше над поясом схода оползней располагаются участки, лишенные донных осадков или с пятнистым их распределением — вплоть до бровки шельфа.

5. Максимальное смещение оползневых тел — многие десятки, а для крупных — сотни километров (для крупнейших более 1 тыс. км).

Таким образом, в северной гумидной зоне выделяется на континентальном склоне оползневый пояс, расположенный в интервале глубин 1100—1200 м, выше которого лежит пояс пятнистых осадочных образований и выходов коренных пород.

Таблица 4. Крупнейшие подводные оползни на континентальном склоне Норвегии [Hafidason et al., 2004]

Показатель	Северное море	Сторегга	Трена-дьюпет	Ник	Андоя	Фуглой Южный	Фуглой Северный	Медвежий
Площадь, км ²	110 000	95 600	141 000	2200	9700	4250 (мин.)	12 250 (мин.)	23 000
Объем общий, км ³	32 000	2400 (мин.) 3200 (макс.)	900	—	—	—	—	1100
Длина до головной части, км	1100	310	20	—	100	—	—	1400
Смещение, км:	~1000	810	200	—	190	110	250	400
по обломочной части, км	—	410	—	—	—	—	—	—
по турбидитам, км	—	400	—	—	—	—	—	—
Возраст, ¹⁴ C	—	7250*	4000	>16 200	<10 000	>10 000?	>10 000?	>20 000

* Возраст в годах (8100 ± 250) лет (календарный) соответствует возрасту цунами в прибрежных зонах Норвегии, Шотландии, Фарерских и Шетландских островов.

6. Крупные оползни происходят редко, но вызывают в сейсмобезопасных частях океанов мощные цунами.

Часто выделяются целые цуги последовательных оползней в одном районе, которые постепенно, нередко с интервалом в тысячи лет наращивают первый главный оползень. Их возникновение часто связывается с изменениями уровня Мирового океана.

Оползни островов — вулканов (Канарские и Гавайские острова) также возникают при малых наклонах подводного склона (от 1 до 17—20°). Их площади достигают 1000 км², но чаще — сотни км².

В 1997 г. на континентальном склоне Норвегии обнаружено и изучено крупное газовое месторождение Ормен Ланге, расположенное недалеко от области отрыва оползня Сторегга, т.е. в области, очень опасной по оползневым явлениям. В связи с этим здесь проведены наиболее полные исследования, включая не только инженерное бурение, но также лабораторные эксперименты, построение разнообразных численных моделей и др. (проекты STRATAGEM Sea Bgd, Ormen Lange и др.). В итоге от парламента Норвегии удалось получить разрешение на работы с вводом в эксплуатацию месторождения в 2007 г. [Solheim et al., 2005]. В настоящее время весь материковый склон Норвегии уже лицензирован, работы здесь проводятся многими фирмами.

В фенах можно заметить зачаточную дифференциацию вещества, перемещенного с первого уровня: наиболее крупный материал сосредоточивается в верхней части конусов, а по направлению к дистальным частям замещается все более тонким [Normark, 1978; Nardin et al., 1979; Vouma et al., 1985; Clark, Pickering, 1996a,b; Vouma, 2000].

Поражают размеры подводных транспортных систем (каналов) и конусов выноса (рис. 14, 15). Глубина вреза каньонов обычно достигает 200—500 м, а для наиболее крупных — 800—1000 м и более. В верхней части они обычно имеют характерную V-образную форму, в нижней — корытообразную [Babonneau et al., 2002; Shanmugan, 2002] (табл. 5).

Впечатляют также размеры подводных конусов. Подводный конус Ганг—Брахмапутра имеет, например, длину около 3 тыс. км и ширину 1 тыс. км, его площадь около 2 млн км². Немного меньше подводный конус выноса Инда — около 1500 км в длину и 960 км в ширину, площадь 1.1 млн км² [Nani, Kolla, 1982; Kolla, Coumes, 1987]. Это, таким образом, осадочные образования глобальных масштабов на дне, области лавинной седиментации второго уровня (ЛС-2) [Лисицын, 1974, 1988, 2004б].

Даже сравнительно небольшая р. Св. Лаврентия имеет подводный конус выноса длиной около 600 км и шириной 250—300 км с максимальной мощностью осадков до 10 км [Uchupi, Austin, 1979; и др.].

Сейсмические исследования последних лет показывают, что скопления осадочного вещества у основания континентального склона в ряде мест имеют мощности, необычные для пелагиали и шельфов — до 10 км и более (16—20 км для Ганга и Брахмапутры, более 10 км для Инда [Uchupi, Austin, 1979; и др.]). Максимальная мощность осадочной толщи в пелагиали океанов составляет первые сотни метров [Лисицын, 1974] (см. рис. 1).

В «малых океанах» — морских водоемах с океанским типом коры — отложения у оснований склона имеют мощность до 9—10 км в Южно-Китайском, до 4—5 км — в Японском, до 5—6 км — в Охотском и до 9—10 км — в Беринговом морях. Эти цифры будут уточняться по данным более детальных исследований.

Если представить себе условно конечный водоем стока округлой формы и больших размеров, то наибольшие массы осадочного вещества (70—90 %) окажутся сконцентрированными в нем по периферии, у основания склона они образуют осадочный тороид (кольцо), уплощенный сверху. Ширина и тол-

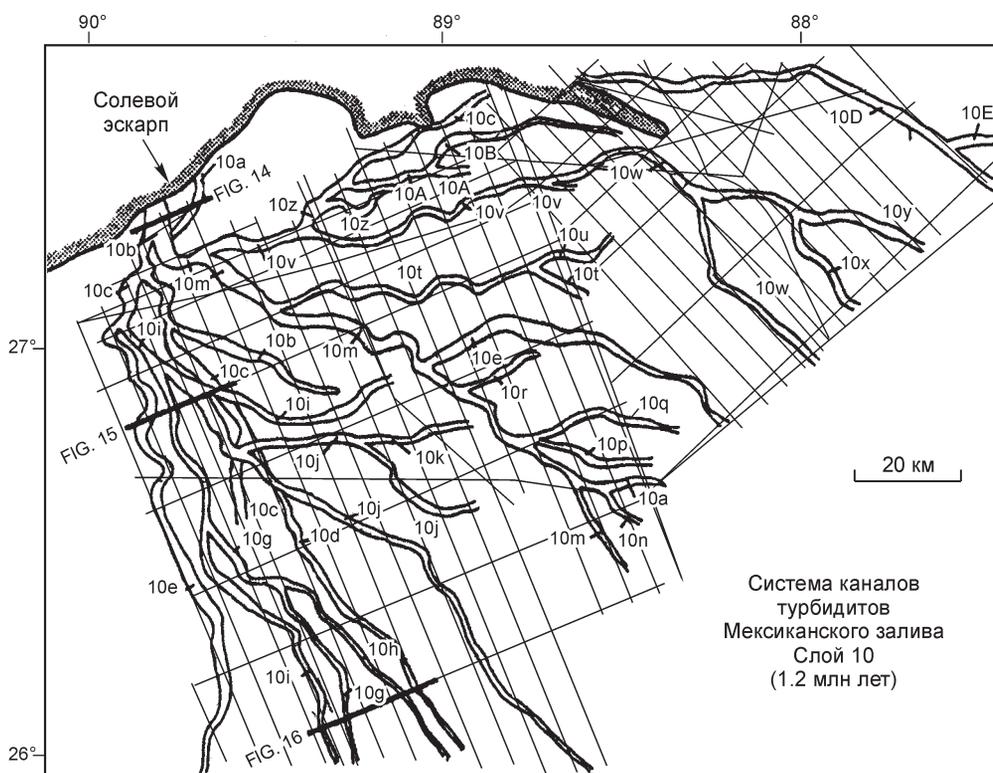


Рис. 15. Схема русел конусов выноса Мексиканского залива для горизонта 10, возраст 1.2 млн лет, показана сетка геофизических профилей.

Буквенные обозначения показывают возраст отдельных ветвей (от а до z) [Global Deep-Water..., 2000].

Такие схемы используются для поиска и разведки нефтегазовых месторождений в Мексиканском заливе. Особый интерес представляют точки разветвления русел, особенно в верхних частях системы (природные коллекторы).

шина тороида увеличиваются близ устьев крупных рек и сокращаются в местах минимального поступления осадочного вещества с шельфа. Это области особого вида седиментации — лавинной (гравититной), отличной от нормальной седиментации «частица за частицей», т.е. концентрированная форма седиментации областей высоких энергий при подготовке, переносе и отложении осадочного вещества, что определяется в целом особенностями гипсографической кривой Земли — мегатектоникой планеты.

Тороидальное осадочное тело часто прерывается, распадаясь на отдельные автономные осадочно-породные бассейны, но общие контуры тороида в океанах и крупных морях обычно просматриваются. Осадочный тороид состоит как бы из множества строительных модулей: подводных конусов выноса, которые сложно меняться в пространстве и во времени. Кажущиеся едиными осадочные образования склона представляют собой, таким образом, как бы «склад конусов» — строительных модулей разных размеров и формы. Общая протяженность осадочного тороида Мирового океана составляет около 350 тыс. км, а его ширина колеблется в пределах 100—1000 км, а в ряде мест превышает 1500 км, мощность до 10 км и более.

Образование особокрупных (глобальных) осадочных тел связано с лавинными (высокими и сверхвысокими) скоростями седиментации, которые сохранялись длительное время. Такие условия нередко возникают близ крупных горных сооружений (Альпийско-Гималайский пояс и др.), поэтому бассейны лавинной седиментации являются коррелятными отложениями областей ураганной денудации, образуют как бы подводный педимент величайших горных массивов суши. Более того, в ряде случаев объем этих коррелятных отложений значительно превышает современный объем питающих их горных сооружений. Это возможно в тех случаях, когда происходит длительный по времени подъем горных сооружений и их длительная денудация.

Так, гигантские осадочные бассейны в устьях Ганга и Инда связаны с подъемом Гималаев со скоростью 100—200 мм/1000 лет, а на отдельных этапах — до 750 мм/1000 лет [Zeitler et al., 1980].

Сходные условия существуют в Альпах и во всей Альпийско-Гималайской зоне и прилегающих к ним осадочных бассейнах. Например, для создания объема осадочных отложений на дне существующих в этих бассейнах необходимо было бы не только полностью размыть Альпы (современная высота 4.8 км), но создать на их месте впадину глубиной до 12 км [Menard, 1964; Clark, Jager, 1969; и др.].

Таблица 5.

**Характеристики наиболее изученных осадочных тел гравититов
(подводные конусы и русла турбидитов) [Currau et al., 2003]**

Конус выноса	Длина конуса, км	Ширина конуса, км	Площадь конуса, 10 ³ км ²	Макс. мощность осадков, м	Объем, км ³	Глубина верхней части, м	Глубина нижней части, м	Диапазон глубин вертикальный, м	Литературный источник
Бенгальский и Никобарский	3800?	~2000	?	16 500	?	1400	5500	4100	[Currau et al., 2003]
Бенгальский (реки Ганг и Брахмапутра)	3000	830—1430	2800—3000	16 500	12.5·10 ⁶	1400	5000	3600	»
р. Инд	1500	<960	1100	>9000	1·10 ⁶	~1500?	~4600?	~3100,	[Kolla, Coumes, 1987; Clift et al., 2001]
р. Амазонка	>700	250—700	330	4200	>7·10 ⁵	1500	4800	3300	[Barnes, Normark, 1985]
р. Миссисипи	540	570	>300	4000	2.9·10 ⁵	1200	3300	2100	»
Монтерей	400	250	75	2000	5·10 ⁴	1280	4570	3290	»
Астория	>250	130	32	2200	2.7·10 ⁴	1140	2840	1700	»
Ла Хойя	40	50	1.2	1600	1175?	550	1100	550	»

Этапы накопления материала гравититов в тороидах чередуются во времени с этапами нормальной седиментации, когда главная часть осадочного вещества, поступающего с суши, аккумулируется в устьях рек и на шельфах (современный этап высокого стояния уровня океана — последние 5 тыс. лет).

На склонах со значительными перепадами глубин по вертикали удается проследить последовательные ряды (сукцессии) гравититов разных типов. Они связаны с разжижением вещества в ходе его движения, с изменениями реологических свойств от пластичных в области оползней до сильно разбавленных суспензий (ряд оползней—грязекаменные потоки—зерновые потоки—тяжелые турбидиты—легкие турбидиты). Дальность выброса осадочного вещества энергией склона достигает 3 тыс. км.

По мере движения по склону последовательно выделяется пояс оползней (глубины 1100—1200 м для Атлантики) — это область подготовки поясов преобладания гравититов нижележащих зон вплоть до пояса легких турбидитов и контуритов, которые граничат с седиментитами — слоистыми пелагическими осадками.

Очень важно, что лавинный перенос вещества гравититами при понижениях уровня океана обеспечивает сохранность органики от окисления, т.е. возможность ее проникновения на большие глубины (до 5 тыс. м). Это позволяет считать второй пояс лавинной седиментации перспективным на газ и нефть, что было прогнозировано еще 20 лет назад [Галимов, Кодина, 1982; Лисицын, 1988] и подтвердилось сейчас тысячами скважин на материковом склоне. Открыт таким образом новый глобальный пояс глубоководных месторождений нефти и газа. И в этом несомненная заслуга морских геологов и океанологов, ведущих исследования Мирового океана.

ТРЕТИЙ ГЛОБАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ЛАВИННОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ

Из гипсографической кривой (см. рис. 7) видно, что главные площади дна океана (73.8 %) расположены в пределах глубин от 3000 до 6000 м. Если к этому добавить еще площади верхней части склона и шельфа (25.9 %), то на глубины третьего уровня (более 6000 м) приходится около 1.1 %. Максимальные глубины в океанах располагаются в областях активных окраин, обычно с сейсмичностью и вулканизмом.

В настоящее время в Мировом океане выделяют 34 глубоководных желоба, но только 28 связаны с активными окраинами, остальные — это глубокие ущелья трансформных разломов. Главная часть периметра Тихого океана (60 %) связана с глубоководными желобами, многие из них с глубинами более 10 км (Марианский, Тонга, Кермадек, Филиппинский).

Объем статьи не позволяет остановиться на этих интереснейших областях, где лавинная седиментация тесно связана с вулканизмом и тектоникой. Обзор данных приведен в работе А.П. Лисицына [1988].

Рассмотрим лишь главные выводы по процессам на третьем уровне.

1. Все желоба сходны по морфологии, их дно плоское и опущено ниже бортов на 2.5—4.0 км, мощность осадочных отложений, несмотря на близость вулканических сооружений и максимальные скорости выветривания в условиях экваториальной и тропической зоны, незначительна — чаще всего меньше 200—500 м, максимально до 1—2 км.

Скорости седиментации здесь лавинные (до 4000 Б), т.е. в 10—500 раз выше, чем скорости седиментации на вышележащих участках дна. На долю гравититов разного типа здесь приходится до 70—80 % осадочной толщи.

Незначительная общая мощность при лавинных скоростях седиментации объясняется затягиванием осадков в зону субдукции. По данным бурения нижние части керна сложены суспенситами и только верхние — гравититами.

2. Магматизм здесь резко отличается от магматизма океанской коры. Происходит гидратация океанской коры и осадков. Часть коры и осадочного вещества уходит на глубины, другая часть — на образование аккреационной призмы. По подсчетам автора в «переплавку» ежегодно поступает около 1.5 км³ осадочного материала, что близко к количеству осадочного вещества, «прорвавшегося» через маргинальный фильтр.

3. Имеются свои особенности осадочного процесса на активных окраинах островодужного и индийского типов. Пока нет никаких надежных свидетельств о накоплении нефти и газа в глубоководных желобах, но следует признать совершенно недостаточным уровень их изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гравититы — осадочные образования глобальных масштабов. Они возникают на границах континентальной и океанской земной коры, на глобальных уступах рельефа высотой 4—5 км (второй и третий уровни лавинной седиментации). Первый уровень расположен на базисе эрозии, т.е. на границе река—море и соответствует глобальной границе пресных и соленых вод.

Гравититы — это главная по массе часть осадочного вещества в Мировом океане, которая за последние десятилетия в новом свете представляется сейчас в результате седиментологических и геофизических исследований, глубоководного бурения, инситажного изучения взвеси и потоков.

При всем разнообразии процессов образования гравититов удается выделить главные закономерности.

1. Глобальное распределение осадочных масс гравититов определяется макро- и мегатектоникой: они отвечают глобальным уступам рельефа — континентальному склону и склонам над глубоководными желобами.

Самые же крупные осадочные тела тесно связаны с границами континентальных плит, зонами коллизии плит. Например, они расположены вдоль простираения всей Альпийско-Гималайской зоны. Здесь на дне морей и океанов возникают глобальные скопления осадочного вещества со сложной системой распределения, которые можно условно назвать осадочным Антиальпийско-Гималайским поясом.

2. Огромное значение имеет изменение уровня Мирового океана, которое приводит то к задержкам осадочного вещества в устьях рек и на шельфе (на первом уровне), как на современном этапе высокого стояния уровня, соответствующего межледниковью, то к его сбросу из маргинальных фильтров и с шельфов — при понижениях уровня (оледенения четвертичного времени и глобальные изменения уровня океана и прилегающей суши — региональные и локальные), которые определяются факторами не только климатическими, но и тектоническими.

3. На мега- и макротектонический фон накладывалось влияние климата не только суши (водосбора), но и климата океана, а также колебания петрофондов и вулканизма (для активных окраин) [Лисицын, 1981].

Таким образом, из четырех законов, определяющих осадкообразование в современных океанах (климатическая, вертикальная, циркумконтинентальная и тектоническая зональность), для гравититов на первые места выходят тектоническая, а также вертикальная зональность.

Хотелось бы подчеркнуть, что эта открывшаяся недавно заново область литологии [Weimer, 1990, 1991; Seismic Facies..., 1991] изучена пока недостаточно и фрагментарно.

Изучение гравититов за последний десяток лет и открытие в них гигантских и супергигантских месторождений нефти и газа [Крылов и др., 1988; Мкртчян и др., 1990; Конторович В.А., 2000; Забанбарк, 2001, 2002; Хаин, Полякова, 2004, 2006, 2007, 2008; Гришкевич, 2005] вызвали настоящий бум в исследовании этого типа осадков на глубинах морей и океанов до 4—5 тыс. м. Уже ведется промышленная добыча с глубин океана более 3 тыс. м, внедряются новые системы поиска и разведки на больших глубинах, строятся уникальные по размерам и оснащению платформы и буровые суда. Становится очевидным, что речь идет о серии крупнейших открытий, имеющих огромное экономическое значение.

Это один из примеров того, какую роль играет фундаментальная наука, в частности, океанологические и морские геологические исследования. Примеры тому — не только тектоника литосферных плит, установленная в ходе фундаментальных исследований океана, но теперь и открытие лавинной седиментации с гигантскими месторождениями нефти и газа, причем не только на шельфах, но также и на огромных глубинах — у основания континентальных склонов. Представляется, что это открытие в значительной мере решит проблему дефицита нефти и газа, по крайней мере, на XXI век!

Работа выполнена при поддержке РФФИ (06-05-64815а; 07-05-00691а; 08-05-00860); Программы № 17 фундаментальных исследований Президиума РАН; гранта Президента РФ (НШ-361.2008.5); проекта «Наночастицы во внутренних и внешних сферах Земли»; государственного контракта № 02.515.12.0004.

ЛИТЕРАТУРА

Безруков П.Л. Зональность и неравномерность осадконакопления в океанах // Современные проблемы географии. М., Наука, 1965, с. 245—249.

Биогеохимия океана / Ред. А.С. Монин, А.П. Лисицын. М., Наука, 1983, 366 с.

Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. М., Наука, 2004, т. 1, с. 55—118.

Галимов Э.М., Кодина Л.А. Исследование органического вещества в осадочных толщах Мирового океана. М., Наука, 1982, 226 с.

Геологическая история океана / Ред. А.С. Монин, А.П. Лисицын. М., Наука, 1980, 462 с.

Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М., Наука, 1983, 159 с.

Гордеев В.В. Реки Российской Арктики: потоки осадочного материала с континента в океан // Новые идеи в океанологии. М., Наука, 2004, с. 113—167.

Гришкевич В.Ф. Макроструктура берриас-аптских отложений Западной Сибири и ее использование при построении информационных технологий в геологии нефти и газа. Тюмень, Наука Сервис, 2005, 116 с.

Демина Л.Л., Гордеев В.В., Фомина Л.С. Формы Fe, Mn, Zn и Cu в речной воде и взвеси и их изменения в зоне смешения речных вод с морскими (на примере рек бассейнов Черного, Азовского и Каспийского морей) // Геохимия, 1978, № 8, с. 1211—1229.

Забанбарк А. Особенности нефтегазовых бассейнов континентальной окраины Бразилии // Океанология, 2001, т. 41, № 1, с. 147—154.

Забанбарк А. Пассивные континентальные окраины Западной Африки и особенности нефтегазоносности их глубоководных частей // Океанология, 2002, т. 43, № 2, с. 308—314.

Конторович А.Э. Формы миграции элементов в реках гумидной зоны: по материалам Западной Сибири и других районов // Геохимия осадочных пород и руд. М., Наука, 1968, с. 88—101.

Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири (Томская область): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2000, 44 с.

Копелевич О.В., Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Карабашев Г.С. Оптические методы в океанологии и морской геологии // Новые идеи в океанологии. М., Наука, 2004, т. 1, с. 118—143.

Котляков В.М. Мир снега и льда. М., Наука, 1994, 286 с.

Крылов Н.А., Бурлин Ю.К., Лебедев Л.И. Нефтегазоносные бассейны континентальных окраин. М., Наука, 1988, 248 с.

Кунин Н.Я. Новые возможности стратиграфических исследований при региональных работах на нефть и газ // Сов. геология, 1983, № 11, с. 109—120.

Лисицын А.П. Некоторые данные о распределении взвеси в водах Курило-Камчатской впадины // Труды Ин-та океанологии АН СССР, 1955, № 12, с. 62—97.

Лисицын А.П. Методы изучения взвеси с геологическими целями // Труды Ин-та океанологии АН СССР, 1956а, т. 19, с. 204—230.

Лисицын А.П. Новые данные о составе и распределении взвешенных веществ в морях и океанах в связи с вопросами геологии // Докл. АН СССР, 1956б, т. 126, № 4, с. 863—866.

Лисицын А.П. Распределение и состав взвешенного материала в водах морей и океанов // Современные осадки морей и океанов. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 175—232.

Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М., Наука, 1974, 438 с.

Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М., Наука, 1978, 391 с.

Лисицын А.П. Зональность природной среды и осадкообразование в океане // Климатическая зональность и осадкообразование. М., Наука, 1981, с. 3—45.

Лисицын А.П. Лавинная седиментация в морях и океанах. Сообщ. 1. Общие закономерности, глобальные уровни и пояса // Литология и полез. ископаемые, 1983, № 6, с. 3—27.

Сообщ. 2. Накопление осадочного вещества в крупнейших дельтах мира. Первый глобальный уровень — закономерности количественного распределения и состава вещества // Там же, 1984, № 5, с. 3—29.

Сообщ. 3. Второй глобальный уровень седиментации и основание материкового склона // Там же, 1985а, № 4, с. 3—25.

Сообщ. 4. Этапы седиментогенеза второго глобального уровня (подготовка, транспортировка, аккумуляция). Модели подводных конусов выноса // Там же, 1985б, № 6, с. 3—20.

Сообщ. 5. Особые механизмы перемещения осадочного вещества и формирование осадочных тел второго глобального уровня. Гравититы, их классы и ряды // Там же, 1986, № 4, с. 3—19.

- Лисицын А.П.** Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М., Наука, 1988, 309 с.
- Лисицын А.П.** Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*, 1994, т. 34, № 5, с. 735—743.
- Лисицын А.П.** Литология литосферных плит // *Геология и геофизика*, 2001а, т. 42(4), с. 522—559.
- Лисицын А.П.** Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // *Глобальные изменения природной среды*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001б, с. 163—248.
- Лисицын А.П.** Новые возможности четырехмерной океанологии и мониторинга второго поколения — опыт двухлетних исследований на Белом море // *Актуальные проблемы океанологии*. М., Наука, 2003, с. 501—554.
- Лисицын А.П.** Геология Мирового океана в третьем тысячелетии — новые подходы, достижения и перспективы // *Новые идеи в океанологии*. М., Наука, 2004а, с. 7—66.
- Лисицын А.П.** Осадочные процессы и минеральные ресурсы материковых склонов Мирового океана // *Актуальные проблемы океанологии*. М., Наука, 2004б, с. 82—152.
- Лисицын А.П., Гордеев В.В.** О химическом составе взвеси и воды морей и океанов // *Литология и полез. ископаемые*, 1974, № 3, с. 38—58.
- Лисицын А.П., Виноградов М.Е.** Международная высокоширотная экспедиция в Карское море (49-й рейс научно-исследовательского судна «Дмитрий Менделеев») // *Океанология*, 1994, т. 34, № 5, с. 643—652.
- Лисицына Н.А.** Вынос химических элементов при выветривании основных пород. М., Наука, 1973, 224 с.
- Лосев К.С.** По следам лавин. Л., Гидрометеиздат, 1983, 136 с.
- Мкртчян О.М., Гребнева И.Л., Игошкин В.П., Карнаев М.А., Нежданов А.А., Филина С.И.** Сейсмогеологическое изучение клиноформных отложений Среднего Приобья. М., Наука, 1990, 108 с.
- Морозов Н.П., Батурич Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г.** О составе взвеси и осадков в устьевых районах Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби // *Гидрохимические материалы*, 1974, т. 60, с. 70—73.
- Монин А.С., Гордеев В.В.** Амазония. М., Наука, 1988, 214 с.
- Хаин В.Е., Полякова И.Д.** Геодинамические предпосылки нефтегазоносности континентальных склонов глубоководных впадин // *Геология и геофизика*, 2004, т. 45 (1), с. 5—14.
- Хаин В.Е., Полякова И.Д.** Глубоководная окраина Восточной Арктики — перспективный объект для поисков нефти и газа // *Докл. РАН*, 2006, т. 410, № 2, с. 234—238.
- Хаин В.Е., Полякова И.Д.** Седиментационные бассейны и перспективы нефтегазоносности шельфа, Восточная Арктика // *Океанология*, 2007, т. 47, № 1, с. 116—128.
- Хаин В.Е., Полякова И.Д.** Нефтегазоносность континентальных окраин Тихого океана // *Литология и полез. ископаемые*, 2008, № 1, с. 92—105.
- Шевченко В.П.** Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М., Наука, 2006, 226 с.
- Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития /** Ред.: В.Н. Коротаев, В.Н. Михайлов, Д.Б. Бабич, Ли Цзусянь, Лю Шугуан. М., ГЕОС, 2007, 445 с.
- Avbovbo A.A.** Tertiary lithostratigraphy of Niger delta as an example of a subduction zone // *Tectonophysics*, 1982, v. 86, p. 113—132.
- Babonneau N., Savoye B., Cremer M., Klein B.** Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan // *Mar. Petrol. Geol.*, 2002, v. 19, p. 445—467.
- Barnes N.E., Normak W.R.** Diagnostic parameters for comparing modern and ancient fans / Eds. A.H. Bouma, W.R. Normak, N.E. Barnes. Submarine fans and related turbidite systems. Berlin, Springer, 1985, p. 125—135.
- Bouma A.H.** Coarse-grained and fine-grained turbidite systems as end member models: applicability and dangers // *Mar. Petrol. Geol.*, 2000, v. 17, p. 137—143.
- Bouma A.H., Normark W.R., Barnes N.E.** Submarine fans and related turbidite systems. N.Y., Springer, 1985, 351 p.
- Clark J.D., Pickering K.T.** Architectural elements and growth patterns of submarine channels: applications to hydrocarbon exploration // *Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 1996a, v. 80 (2), p. 194—221.
- Clark J.D., Pickering K.T.** Submarine channels: processes and architecture. London, Vallis Press, 1996b, 231 p.
- Clark S.P., Jager E.** Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data // *Amer. J. Sci.*, 1969, v. 267, p. 1143—1160.

Clift P.D., Shimizu N., Layne G.D., Blusztajn J.C., Gaedicke C., Schlüter H.U., Clark M.K., Amjad S. Development of the Indus Fan and its significance for the erosional history of the Western Himalaya and Karakorum // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2001, v. 113, p. 1034—1051.

Curry J.R., Emmel F.J., Moore D.C. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes // *Mar. Petrol. Geol.*, 2003, v. 19, p. 1191—1223.

Deltaic sedimentation: modern and ancient / J.P. Morgan. *Soc. Econom. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.* 15, 1970.

England P. Metamorphic pressure estimates and sediments volumes for the Alpine orogeny: an independent control on geobarometers? // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1981, v. 56, p. 387—397.

Gibbs R.J. Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon Rivers // *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1977, v. 88, p. 829—843.

Global Deep-Water Reservoirs / P. Weimer, R.M. Slatt, J.L. Coleman, N. Rosen, C.H. Nelson, A.H. Bouma, M. Styzen, D.T. Lawrence. *Gulf. Coast. Sect., SEPM Foundation*, 2000.

Haffidason H., Sejrup H.P., Nygard A., Meinert J., Bryn P., Lien R., Forsberg C., Berg K., Masson D. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development // *Mar. Geol.*, 2004, v. 213, p. 201—234.

Hühnerbach V., Masson D.G. Partners of COSTA. Project Landslides in the North Atlantic and its adjacent analysis of their morphology setting and behavior // *Mar. Geol.*, 2004, v. 213, p. 343—362.

Kolla V., Coumes F. Morphology, internal structure, seismic stratigraphy and sedimentation of the Indus fan // *AAPG Bull.*, 1987, v. 71, p. 650—677.

Lee H.J., Chough S.K. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea // *Mar. Geol.*, 1989, v. 87, № 2—4, p. 195—205.

Lowe D.R. Sediment gravity flows. II. Depositional models with special reference to the deposits of high density turbidity currents // *J. Sed. Petrol.*, 1982, v. 52, p. 279—297.

Martin J.M., Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers // *Mar. Chem.*, 1979, v. 7, № 2, p. 179—206.

Mayall M., Jones Ed., Casey M. Turbidite channel reservoirs — key elements in facies prediction and effective development // *Mar. Petrol. Geol.*, 2006, v. 23, p. 821—841.

Meade P.H., Nordin C.F., Curtis W.F., Costa-Rodrigues F.M., do Vale C.M., Edmond J.M. Sediment loads in the Amazon River // *Nature*, 1979, v. 278, p. 161—163.

Menard H.W. *Marine geology of the Pacific*. N.Y., Mc Grow-Hill, 1964, 271 p.

Milliman J.D. Morphology and structure of Amazon upper continental margin // *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, 1979, v. 63, p. 934—950.

Milliman J.D., Boyle E.M. Biological uptake of dissolved silica in the Amazon River estuary // *Science*, 1975, v. 189, p. 995—997.

Milliman J.D., Meade R.H. World-wide delivery of river sediment in the ocean // *J. Geol.*, 1983, v. 91, p. 1—21.

Nani B.R., Kolla V. Acoustic character and thickness of sediments of the Indus fan and the continental margin of Western India // *Mar. Geol.*, 1982, v. 47, № 3/4, p. 181—195.

Nardin T.R., Hein F.J., Gorsline D.S., Edwards B.D. A review of mass movement processes in slope and base-slope systems versus canyon-fan-basin floor systems // *Soc. Econ. Paleontol. Miner. Spec. Publ.*, 1979, v. 27, p. 61—73.

Normark W.R. Fan valleys, channels and depositional lobes on modern submarine fans: characters for recognition of sandy turbidite environments // *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, 1978, v. 62, p. 912—931.

Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems / P. Weimer, M.H. Link. N.Y., Springer, 1991, 441 p.

Shanmugan G. Ten turbidite myths // *Earth Sci. Rev.*, 2002, v. 58, p. 311—341.

Shepard F.P. Delta front valleys bordering the Mississippi distributaries // *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1955, v. 66, p. 1488—1499.

Sholkovitz E.R. Flocculation of dissolved organic and inorganic matter during the mixing of river water and sea water // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1976, v. 40, № 7, p. 831—845.

Sholkovitz E.R. The flocculation of dissolved Fe, Mn, Al, Ca, Ni, Co and Cd during estuarine mixing // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, v. 41, № 1, p. 77—86.

Solheim A., Bryn P., Sejrup H.P., Mienert J., Berg K. Ormen Lange — an integrated study for the safe development of a deep-sea gas field within the Storegga Slide Complex, N.E. Atlantic continental margin: executive summary // *Mar. Petrol. Geol.*, 2005, v. 22, p. 1—9.

Uchupi E., Austin J.A. The stratigraphy and structure of the Laurentian cone region // *Can. J. Earth Sci.*, 1979, v. 16, p. 1726—1752.

Vail P.R., Hardenbol J. Sea level change during the Tertiary // *Oceanus*, 1979, v. 22, p. 71—79.

Vail P.R., Mitchum R.M., Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. 4. Global cycles of relative changes of sea level // *Amer. Ass. Petrol. Geol. Mem.*, 1977, v. 26, p. 83—97.

Weimer P. Sequence stratigraphy, facies geometries and depositional history of the Mississippi Fan, Gulf of Mexico // *AAPG Bull.*, 1990, v. 74, p. 425—453.

Weimer P. Seismic facies, characteristics and variations in channel evolution, Mississippi Fan (Plio-Pleistocene), Gulf of Mexico / Eds. P. Weimar, M.H. Link. *Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems*. N.Y., Springer, 1991, p. 323—349.

Zeitler P.K., Tahirkheli R.A., Naeser C.W., Johnson N.M., Lyons J. Uplift on the lesser Himalayas Northern Pakistan, as inferred from fission trace ages of sphene, epidote and zircon. *Fission Track Dating Workshop*. Pisa, 1980, 239 p.

*Поступила в редакцию
5 сентября 2008 г.*