

СЕДИМЕНТОЛОГИЯ

УДК 551.14+551.2

АРИДНАЯ СЕДИМЕНТАЦИЯ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ. РАССЕЯННОЕ
ОСАДОЧНОЕ ВЕЩЕСТВО АТМОСФЕРЫ

А.П. Лисицын

Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия

Исследования, проведенные за последние десятилетия на суше, в областях подготовки осадочного вещества, по путям его переноса на разных высотах в атмосфере и выпадения на поверхность океана (природный планшет) привели к выводу о существовании глобальной системы дальнего высотного (транс-океанского) переноса вещества особого состава и свойств. Это тонкие микро- и наночастицы (94 % мельче 2 мкм), которые своим происхождением отвечают тропическим и субтропическим аридным (бессточным) зонам суши и продолжают в океаны. По составу и свойствам они соответствуют пелагическим глинам (красная глубоководная глина и др.). Со спутников и высотных самолетов удалось исследовать пылевые облака по путям их дальнего, в том числе трансокеанского, переноса. Эти данные дополнены пробами, собранными на островах и в рейсах экспедиционных судов, из кернов покровных и горных ледников, а также изучением продуктов распространения ядерных взрывов и извержений вулканов.

По ряду признаков выделены зоны аридной седиментации, т.е. определенной климатом (недостатком воды), подготовкой рассеянного аэрозольного вещества на суше, его транспортировкой ветром на разных высотных уровнях и отложением на поверхность океана. Транспортировка идет на двух высотных уровнях (от поверхности до облаков и выше облаков, 5—7 км), где скорость ветра достигает 300 км/ч, чем и определяется дальность переноса.

Выделены три типа переноса, отличающиеся не только динамикой, но и составом, и свойствами микро- и наночастиц: 1 — локальный (0—10 км от источника); 2 — региональный (100—1000 км); 3 — глобальный (более 1000 км). Материал глобального переноса — тонкий. Общая поставка эолового материала определена 1.6 млрд т/год, что близко к поставке речного материала в пелагиаль, т.е. за пределы маргинальных фильтров. Поставка идет из четырех главных источников на суше с осаждением в морских частях аридных зон. Общая их площадь составляет около 1/3 площади Мирового океана. Во время оледенений в связи с понижением уровня на 100—120 м развеивались рыхлые осадки с осушки шельфа, которая по площади приближалась к площади всей Африки. Это приводило к росту запыленности атмосферы в 3—5 раз и ослаблению теплового потока Солнца в связи со снижением прозрачности атмосферы. Аридные морские осадки прошлого изучаются в колонках и кернах глубоководного бурения. Обосновываются новыми данными недавно открытые процессы аридной седиментации в морях и океанах.

Аэрозоли, рассеянные формы осадочного вещества, потоки вещества вертикальные и горизонтальные, аридные зоны океанов, зональность климатическая, красные глубоководные глины, аридный тип морской седиментации, природные ловушки и самописцы.

ARID SEDIMENTATION IN THE OCEANS AND ATMOSPHERIC PARTICULATE MATTER

A.P. Lisitzin

Recent studies of the continental sources of aerosol production, transport, and deposition to the ocean (natural sink) allowed us to recognize the possibility of long-range high-altitude (transoceanic) transport of aerosol dust of specific composition and properties. The dust consists of fine (micro- and nanosized) particles (94%, less than 2 μm) originated in the arid (undrained) tropical and subtropical regions extending into the oceans and are similar in composition to deep-sea (pelagic) red clays. Satellite and aircraft observation data were used to track trajectories of long-range (and transoceanic) transport of dust clouds. These data were coupled with direct shipboard measurements on ice core records and data on nuclear explosions and volcanic eruptions.

Several zones of arid sedimentation were identified based on climatic conditions (shortage of water), conditions of dust production, wind-blown transport at different altitudes, and deposition onto the ocean surface. The main transport occurs at two altitude scales (from land to the cloud top and above) (5–7 km) where wind speed of 300 km/h will be critical for a long-range transport.

Three types of transport are identified based on the particle dynamics, composition and properties: 1 — local (0–10 km from the source); 2 — regional (100–1000 km); and 3 — global (over 1000 km). The finer par-

ticles are the product of local-scale transport with a total flux of 1.6 billion t/yr, which is almost equal to the net influx of the riverine terrigenous material to the pelagic zones of the oceans (outside the marginal filters). There are four main sources of aerosol dust, which is transported and deposited over arid oceanic regions. The arid oceanic regions account for about 1/3 of the modern ocean surface. During glacial periods, the sea-level drop of 100–120 m caused a significant increase in the size of arid regions as a result of the exposure of the shelf areas, which is equal to the area of the African continent. This caused 3–5 times higher dust emission and a decrease in the heat flux and in the transparency of the atmosphere. Comparison of ice core records and deep drilling data provide a basis for studies of the ancient arid sedimentation.

Aerosols, particulate sedimentary material, vertical and horizontal fluxes, arid oceanic zones, climate zones, deep-sea red clays, arid oceanic sedimentation, natural traps and recorders

ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени осадочное вещество атмосферы и, соответственно, отложения, связанные с осаждением этого вещества, были вне круга интересов литологии. Это связано, прежде всего, с малыми количествами осадочного вещества и мелкими размерами его частиц.

Так же как бактерии и другие микроорганизмы, невидимая невооруженным глазом рассеянная часть осадочного вещества Земли образует ее внешнюю оболочку, переходную к космосу.

Обычно литологи изучали дисперсные системы с водной средой и твердой дисперсной фазой, т.е. осадочный материал в реках, морях и океанах. За последние годы в лаборатории физико-геологических исследований Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН начаты исследования рассеянного осадочного вещества в газовой среде — атмосфере, а также в твердой (лед) среде (осадочное вещество речных и морских льдов и снега), т.е. в криосфере, и в других внешних геосферах в их взаимодействии. Рассеянное вещество, поступающее на дно океана из глубинных слоев Земли (гидротермы, факелы «черных курильщиков», металлоносные осадки), изучается с применением подводных аппаратов. Особенность нашего подхода в том, что изучаются не только донные осадочные отложения, т.е. концентрированные формы осадочного вещества, но также и мелкие, с развитой поверхностью рассеянные формы осадочного вещества, находящегося во взаимодействии со средой и потому накапливающего информацию о среде, т.е. это новый источник океанологической и литологической информации на твердом носителе [Лисицын, 2004 а,б].

Таким образом, круг исследований в седиментологии значительно расширяется, особенно, если по единой программе и методике исследований проводится изучение вещества, присутствующего в рассеянной форме не в одной среде (например в атмосфере), а во всем Мировом океане, т.е. во всех геосферах, рассеянное вещество которых в конечном счете попадает на дно океана — глобального коллектора осадочного вещества всех семи внешних и одной внутренней (вулканы и гидротермы) геосфер. Именно такой подход оказался, как увидим на примере изучения рассеянного осадочного вещества атмосферы, наиболее перспективным для понимания всего разнообразия современных осадочных процессов: он позволяет видеть формирование донного осадка из рассеянного вещества на самых ранних стадиях. Специально следует подчеркнуть, что изучение процесса ведется напрямую (инситу), т.е. в воздушной среде с применением целого комплекса новых методов и приборов (спутники, методы гидрооптики и гидрофизики, создание седиментационно-геохимических обсерваторий, которые могут вести круглогодичные исследования в автономном режиме на любых глубинах, а также в атмосфере и под толщей льдов).

Исследование осадочного процесса только с помощью все более детального отбора проб и детального анализа донных осадков для понимания сути процесса дает мало. Необходим учет многообразных условий во взаимодействии среда—взвесь (при изучении древних пород это невозможно). Поэтому необходимо изучение именно на современных объектах не только современных осадков, но и процессов, которые определяют количественное распределение, состав и свойства этих осадков (и осадочных пород). К сожалению, эта часть исследований остается малоразработанной, отсюда многочисленные построения моделей, теорий, в том числе теории океанской седиментации без попытки изучения самих процессов.

Цель настоящей статьи — ознакомить с результатами многолетних исследований осадочного вещества и осадочных процессов в атмосфере.

Рассеянный осадочный материал встречается не только в виде аэрозольных отложений на суше (пески пустынь, лессы, эвапориты). Это также почти неизученный рассеянный эоловый материал в толще вод и эоловые донные осадки в морях и океанах, а также характерная для всего осадочного материала Земли постоянная примесь этого вездесущего эолового вещества во всех внешних геосферах. Она отчетливо видна в снеге и морских льдах, в кернах бурения континентальных и горных ледников, в био-

генных процессах — распространении на суше растений аэрозольного питания, не имеющих корневой системы (ягель и другие лишайники), а в море — кораллов и особой ассоциации планктона (эоловая пыль содержит достаточные количества биогенных элементов).

Первая важнейшая особенность рассеянного аэрозольного вещества (называемого в обиходе пылью) — его повсеместность. Удаление частиц взвеси из воздуха достаточно сложная и затратная операция, которая обязательна сейчас в атомной и полупроводниковой промышленности, а также при работе в современных аналитических лабораториях.

Существуют стандарты чистоты воздуха. При многократной фильтрации удается добиться уровня Евро-1 (< 10 частиц/л воздуха). Воздух, которым мы дышим, содержит десятки и сотни тысяч частиц в литре, а каждый человек за время жизни отфильтровывает при дыхании около 2 кг рассеянного аэрозольного вещества. За сутки человек использует 170 тыс. л воздуха.

Вторая особенность — тонкость частиц аэрозолей: главная их часть, вопреки представлениям о песках пустынь, обычно имеет пелитовую размерность (мельче 1 мкм), и только в локальных и региональных масштабах отмечается перенос и накопление отложений со значительным содержанием песка и алевритов (пустыни и лессы), нередко с щебнистым защитным покровом. Тонкость частиц регионального и глобального переноса, наиболее распространенных в пелагических осадках, обеспечивает большую дальность их переноса.

По прямым наблюдениям к локальным переносам относят эолиты, отложившиеся на удалении до 10 км от источника, региональные — до 1000 км и глобальные — более 1000 км [Лисицын, 1978; Lawrence, Neff, 2009]. Установлен рост скорости ветра, переносящего аэрозоли, с увеличением высоты. Скорость воздушного переноса на высоте около 10 км достигает 100—500 км/ч («струйные течения»). Эти потоки огибают на больших высотах Землю и имеют вид плоских труб огромных размеров, изгибающихся подобно рекам. Направление и скорость ветра меняются также по сезонам и от конкретной метеобстановки. На высотах существует своя особая система транспортировки в отличие от рек, ограниченных берегами и глубиной. Время пребывания частиц в атмосфере колеблется от первых секунд до 5—6 лет. Соответственно меняется дальность их переноса от источника аэрозолей [Лисицын, 1978, 2001].

Главная часть переноса вещества в атмосфере идет в интервале высот от 0 до 10—15 км, а дальность переноса зависит от высоты выброса осадочного материала вихрями, торнадо, тайфунами или вулканическими взрывными извержениями, т.е. от попадания вещества на разные уровни в высотных воздушных потоках (рис. 1).

Удаление осадочного вещества из атмосферы производится либо осадением под влиянием силы тяжести (сухое осаднение), либо вымыванием дождем и снегом (в интервале высот 0—5, реже 10 км). На

больших высотах (выше уровня облаков) — сульфатное вымывание. Дальний и сверхдальний перенос возможен только выше уровня облачности (т.е. выше уровня вымывания пыли каплями воды из облаков).

Важно подчеркнуть, что струйные течения большое значение имеют в аридных зонах суши, они ориентированы по широтным поясам и пересекают океаны. Образуются два глобальных кольца (пояса) — северное и южное, разделенных внутритропической зоной гумидной экваториальной конвергенции. Таким образом, главная часть эолового рассеянного вещества возникает на суше, но переносится и осадается (причем в одних и тех же зонах) в океанах. Области эмиссии — это приблизительно 30 % площади суши и такая же площадь осадения в океане. Это

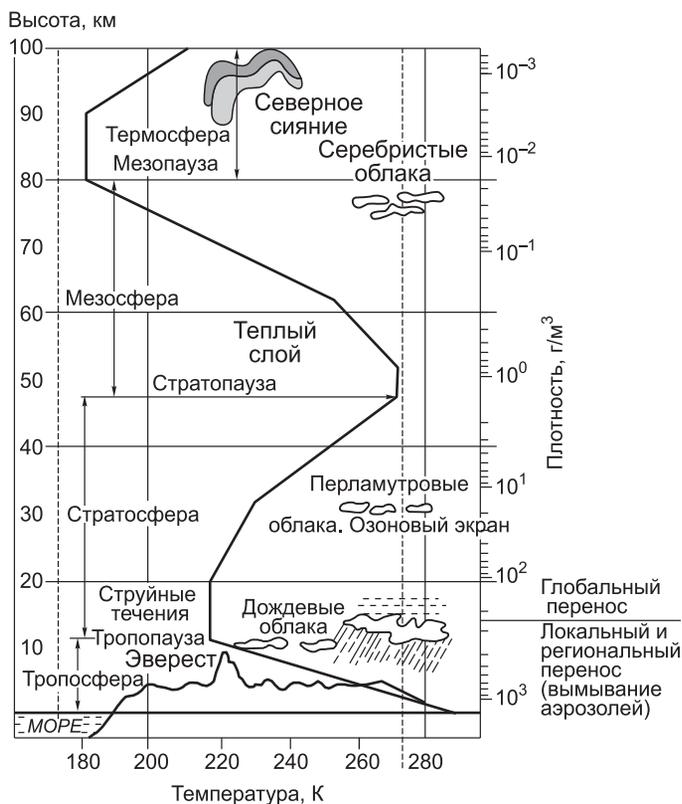


Рис. 1. Стрoение атмосферы, вертикальное распространение аэрозолей и механизмы их осадения.

Нижний горизонт — ниже уровня облаков (вымывание аэрозолей дождями и снегом), верхний — в основном сухое осаднение. Рост скорости ветра на верхнем уровне до 300—350 км/ч (струйные течения).

части единой глобальной аридной зоны (с выпадением менее 200 мм атмосферных осадков). Биологи называют ее сухой тропической и субтропической зоной.

О важности рассеянного аэрозольного вещества и аридных поясов, где идет подготовка, транспортировка и отложение этой формы осадочного вещества, говорит то, что общий вклад золотого рассеянного вещества, ежегодно поступающего в Мировой океан, по определениям разными методами, составляет от 1 до 3 млрд т (по данным автора — около 1.6 млрд т) [Лисицын, 1978].

Этот вклад сопоставим с вкладом речного осадочного материала после его прохождения через маргинальные фильтры — 1.8 млрд т/год [Лисицын, 1978, 1994, 2001].

Осадконакопление в пелагиали океанов и морей (в их аридных зонах) — это главный вид минерального осадочного вещества, которое дает начало красным глубоководным глинам, а также составляет минеральную часть карбонатных кокколитофоридовых и фораминиферовых осадков, т.е. осадков, которые «запрещены» в принципе (в соответствии с «теорией океанской седиментации»). Запрещены, но изучены, а также пройдены в ходе глубоководного бурения, сопоставлены с осадочными образованиями и процессами на континентах.

Литоологи забывают, что они живут на дне воздушного океана с его уникальным осадочным веществом!

Насколько обоснованы приведенные положения?

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Методы изучения золотого вещества атмосферы для целей седиментологии и геохимии почти не разработаны. Для полноценного исследования по принятой в лаборатории физико-геологических исследований РАН методике изучения осадочного вещества всех геосфер нужно иметь достаточное количество материала, отобранного в определенных природных зонах, на определенных высотах (или глубинах) и в необходимые для исследований сезоны года. Методики, удовлетворяющие всем этим требованиям (при обязательной чистоте отбора), практически отсутствовали. Нами была создана и применена новая методика с использованием современных приборов и решений.

В этой работе принимали участие кроме лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН сотрудники Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск), Института атмосферы РАН, Института кинетики горения СО РАН, а также участники проекта «Аэрозоли Сибири», имевшие опыт организации наземного мониторинга атмосферы.

Исследования были начаты автором в 1950—1953 гг. в дальневосточных морях в экспедициях «Витязя», и продолжаются со значительными усовершенствованиями сбора и обработки материала до настоящего времени [Лисицын, 1955, 1978, 2001; Шевченко и др., 1999, 2000].

Институт океанологии РАН с 1949 г. провел более 300 экспедиций на крупных исследовательских судах, которые охватили почти все океаны и моря. В значительной части этих экспедиций собирались взвесь и донные осадки (рис. 2). Кроме того, регулярно исследовались аэрозоли Арктики и Антарктики с ледоколов, на дрейфующих станциях и на островах. В целом удалось получить уникальный по объему и по качеству материал, который дополнялся данными зарубежных исследователей (особенно в годы после перестройки).

Особенно трудным было получение достаточного количества материала в условиях самых низких на Земле содержаний рассеянного вещества (в центральных частях океана, удаленных на тысячи километров от ближайшей суши). Кроме того, приземные слои атмосферы богаты влагой и солями, а само исследовательское судно является источником разного рода загрязнений. Погода в море неустойчива, нередко дожди или шквалы, которые могут испортить пробу.

Принятая в настоящее время методика включает как прямые, так и дистанционные методы. К прямым относятся фильтрация воздуха через фильтры разных систем (в сравнении со стандарт-фильтром Ватман-41), сбор взвеси электростатическим методом на нейлоновые сети большой площади фильтрации (10 м²), которые выставляются на высоте над палубой с носовой мачты судна. Одновременно с этим используются электронные счетчики частиц разных систем (с поправкой на морскую соль), а также однокаскадные и многокаскадные импакторы.

Для сбора значительных количеств взвеси с целью изучения радиоактивных элементов и минералогии в ряде рейсов использовалась фильтровальная установка с фильтрами-полотнищами Петрянова производительностью до 100 тыс. м³/ч. При работах на Белом море использовались также круглосуточные сборы на береговых станциях с фильтровальными установками для воздуха и упрощенными седиментационными ловушками (Соловецкие острова, станция МГУ), а также данные о видимости и пылевых бурях.

Одновременно использовался материал из природных ловушек аэрозолей: сбор снега и дождя, вымывающих растворимые и нерастворимые составляющие рассеянного осадочного вещества. В высо-

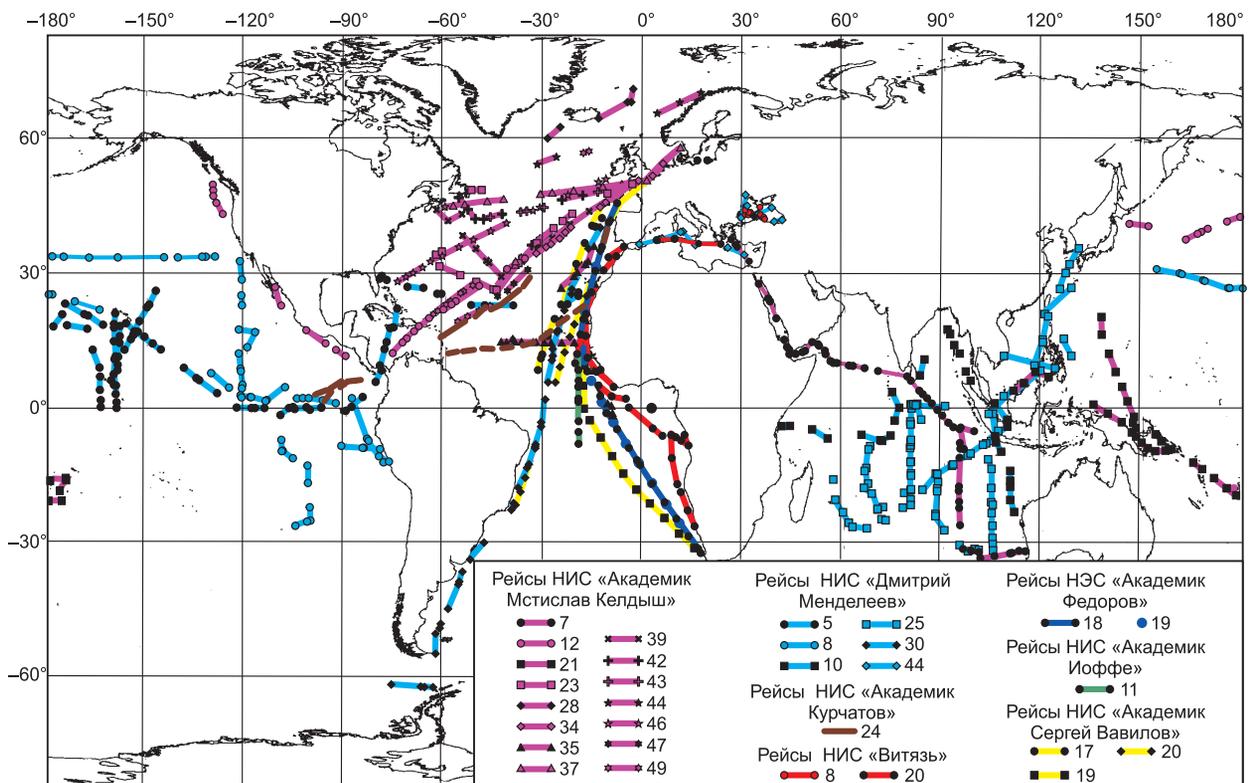


Рис. 2. Изучение микро- и наночастиц аэрозолей в приземном слое атмосферы в рейсах экспедиционных судов Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Кроме того, многолетние исследования проводятся на мегаполигонах «Белое море» 10 лет и «Каспийское море» 4 года.

ких широтах снеговой самописец работает большую часть года — от становления снежного покрова до его таяния, используются многолетние скопления на природных планшетах паковых льдов и ледников.

При работах в морях Арктики природные самописцы изучались на суше (в водосборе): лишайники аэрозольного питания (ягель и др.), верховые болота (омбротрофные) с аэрозольным питанием, в этом случае удавалось получать данные по значениям потоков и составу аэрозольного вещества для последних десятков и сотен лет, а также данные о растительности на основании спорово-пыльцевого анализа и др. Аэрозольная составляющая определялась также и при изучении торфяников и озер. Так же как и при изучении водной толщи океанов и морей, исследования осадочного вещества велись в четырехмерной (4D) системе (три координаты в пространстве, четвертая — во времени) [Лисицын, 2003].

Специальное внимание уделялось изучению загрязнений атмосферы, в том числе начаты работы по изучению «черного углерода». Небольшое количество проб было получено в шурфах снежниц и фирновых льдах о. Шпицберген.

Лабораторный анализ проб проводился по методике, принятой для одновременного изучения проб рассеянного осадочного вещества из других геосфер (морская и речная вода, лед и др.) с очисткой воздуха в лаборатории до Евро-2, -3.

Поскольку количество осадочного вещества в рассеянной форме обычно было небольшим, применялись методы анализа особой чувствительности (ИНАА, атомная адсорбция во всех вариантах, а также ICP-MS и другие высокие технологии анализа).

Следует отметить, что с началом перестройки не только практически прекратились наши исследования в океанских рейсах, но сократились и возможности аналитических исследований. Этот пробел в значительной мере удалось восполнить совместными исследованиями с зарубежными специалистами (особенно в Арктике).

В целом можно сказать, что полученные материалы о рассеянном осадочном веществе атмосферы достаточно представительны: они охватывают практически весь Мировой океан, т.е. 71 % поверхности Земли. Представительны они и по аналитической обработке — она проведена на том же уровне, что и для рассеянного материала в других геосферах с использованием международных стандартов, т.е. пригодна для сравнительного изучения осадочного вещества рассеянного в разных геосферах Земли.

ОБЛАСТИ ПИТАНИЯ АТМОСФЕРЫ ОСАДОЧНЫМ ВЕЩЕСТВОМ (ОБЛАСТИ ДЕФЛЯЦИИ) И ИХ СВЯЗЬ С ПРИРОДНОЙ СРЕДОЙ

Аридные зоны в океанах и морях (тропические и субтропические) четко выделяются на картах природной зональности, а также на графиках испарения и испаряемости (рис. 3, 4) и особенно четко — на картах первичной продукции фитопланктона — источника первопищи и органического вещества в морях и океанах. Они очень уверенно выделяются в глобальном масштабе и по спутниковым данным (и верифицируются при экспедиционных исследованиях), т.е. могут наблюдаться круглогодично и много лет подряд.

Размеры аридных зон огромны — это два пояса, вытянутых вдоль экватора, — северная и южная аридные зоны, их протяженность — многие тысячи километров (рис. 5). Это глобальные по масштабам зоны, в которых аридные условия создаются не за счет недостатка воды (как на суше) и высокой солнечной радиации, а за счет особой вертикальной структуры водной толщи. Сюда не впадают реки (кроме нескольких транзитных), но в поставке осадочного вещества главную роль играет перенос и разгрузка вещества атмосферы, захваченного из аридных зон (пустынь и степей) суши. Это зоны эмиссии рассеянного аэрозольного вещества на континентах.

Как известно, развитие жизни в морях и океанах определяется продуцированием органического вещества фитопланктоном в поверхностном деятельном слое. Его толщина всего несколько десятков, редко до 200 м. В аридных зонах этот деятельный слой круглый год лишен связи с глубинными водами, богатыми биогенными элементами, которые необходимы для фотосинтеза. Это явление скачка плотности воды — пикноклин. В других климатических зонах эта глубинная заслонка приоткрывается обычно осенью или зимой и пропускает в деятельный слой годовую порцию биогенов. В аридных зонах установлены минимальные для всего Мирового океана значения первичной продукции, что приводит к крайне слаборазвитой жизни по всей биологической цепочке (зоопланктон—нектон—бентос), и маркируется на островах этой зоны (атоллы и вулканические острова) как в их атмосфере, так и в почвах. Здесь же самые прозрачные воды, т.е. содержание взвеси минимальное.

Скачок плотности, возникающий под деятельным слоем, — это следствие сильного испарения, возникновения дефицита биогенов в развитии морской (фито- и микропланктон) и сухопутной (растительность пустынь) растительности.

В этих же двух глобальных аридных поясах располагаются крупнейшие пустыни и полупустыни суши, области подготовки, транспортировки и частичного отложения осадочного вещества [Страхов, 1963; Петров, 1973]. Аридные зоны суши протягиваются в океан не только по климатическим особенностям, они питают океан терригенным аэрозольным материалом и (как сейчас установлено) биогенными элементами, а также усвояемыми формами Fe. В свою очередь, из аридных областей океанов огромное количество воды (в виде пара, а затем облаков), а также соли переносится на сушу.

Эта тесная связь природных зон континентов и океана известна еще с античного времени и особенно подчеркивалась в работах В.В. Докучаева [1951; и др.] и его ученика В.И. Вернадского [2001], но

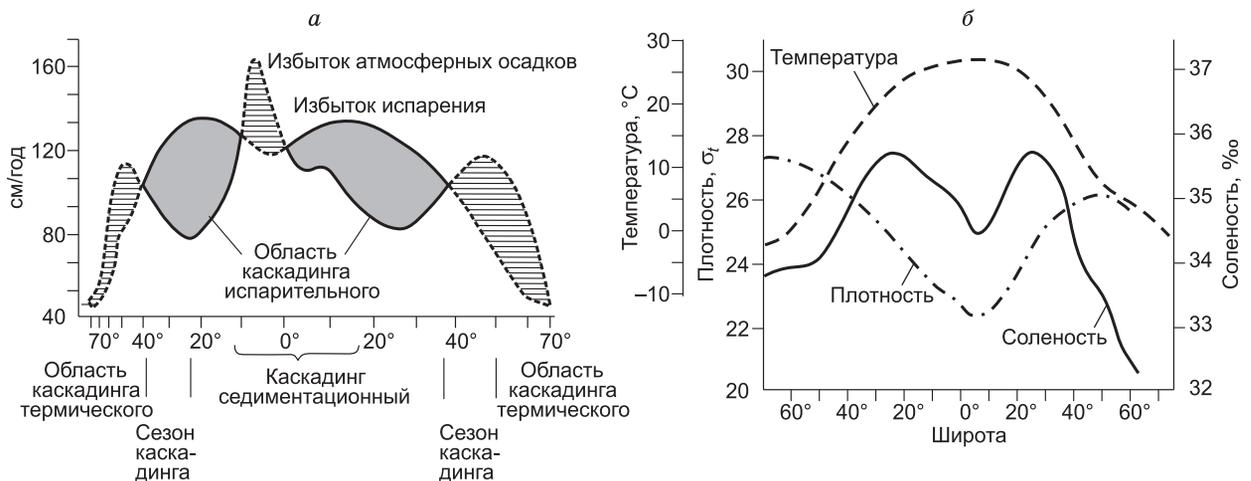


Рис. 3. Смена гумидных и аридных условий на меридиональном разрезе через океаны.

а — зоны избыточного выпадения атмосферных осадков (гумидные) и зоны дефицита атмосферных осадков (аридные); б — температура, соленость и плотность поверхностных вод на меридиональном разрезе. Два пика солености соответствуют северной и южной аридным зонам, впадина — экваториальной гумидной зоне.

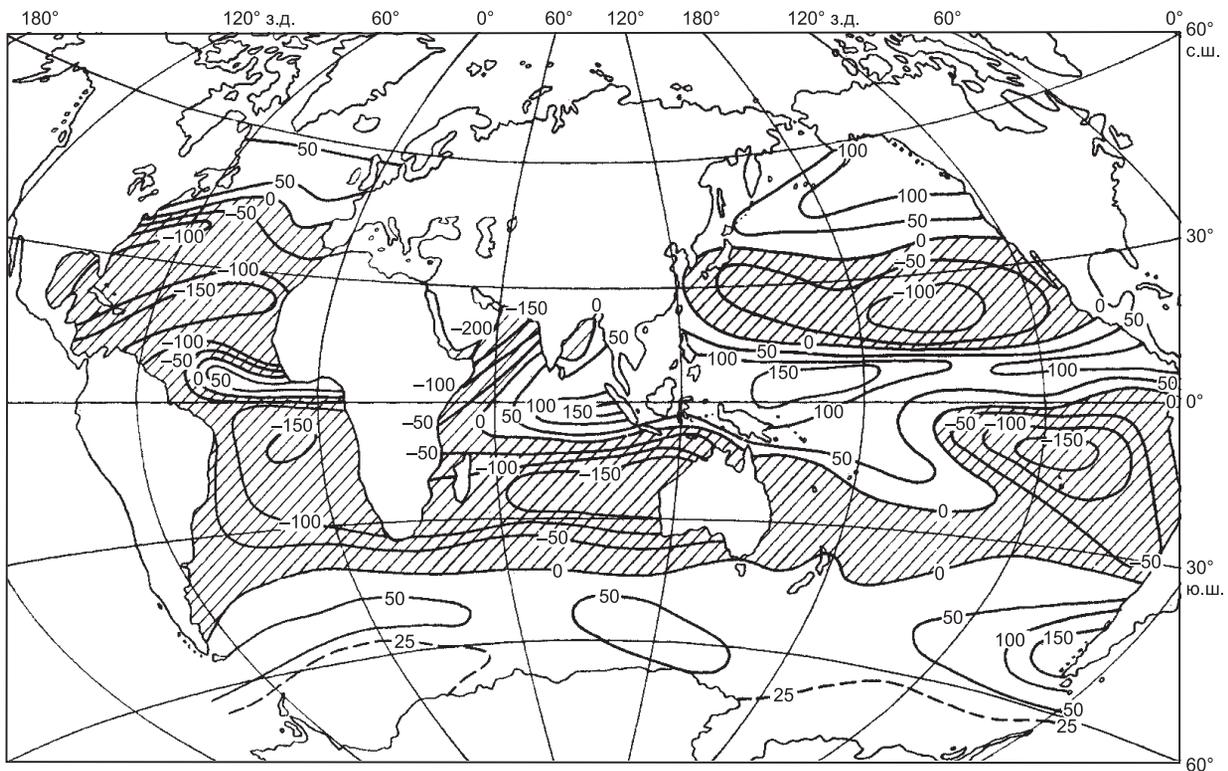


Рис. 4. Карта водообмена для поверхностного слоя вод океана (г/см²/год).

Заштрихованы области отрицательного водообмена (испарение больше выпадения атмосферных осадков) — аридные зоны [Лосев, 1989].

отрицалось в работах Н.М. Страхова [1993; и др.]. Современные данные по прямому изучению (а не балансным подсчетам) осадочного процесса в морях и океанах показали, что сейчас осадочный процесс на всех его этапах может быть охарактеризован не только числом, мерой, составом и свойствами, а также во времени, и определяться не только речными взвесями, но и взаимодействием осадочного вещества во всех внешних и частично (вулканизм, гидротермы) внутренних геосферах с огромным, часто определяющим, влиянием биоты.

Общая площадь современных зон аридного климата в Мировом океане составляет около 1/3 от его поверхности, т.е. эти зоны превышают по площади зоны аридного седиментогенеза на суше и в общем продолжают их через главные по площади части Земли — океаны. Образуются два аридных пояса, разделенных узкой экваториальной гумидной зоной (см. рис. 5).

В океане, так же как и на суше, в зоне пустынь нередко оазисы с богатой растительностью. Такие океанские оазисы носят название апвеллингов и располагаются на шельфах. Богатство жизни здесь связано не с недостатком воды, а опять-таки с явлением пикноклина. При постоянных и сильных сгонных ветрах безжизненные воды верхнего слоя получают необходимые биогены в местах «прорыва» пикноклина в деятельный слой. С апвеллингами связана значительная часть вылова рыбы. Здесь накапливаются осадки особого типа.

Но не только круглогодичный пикноклин определяет природу и осадкообразование в этих зонах. Здесь свои особые процессы подготовки транспортировки и отложения рассеянного осадочного вещества атмосферы, которые находят отражение как в количестве, так и в вещественном составе и свойствах донных осадков. Здесь господствует осадочное вещество не рек, а атмосферы, которое переносится на большие расстояния ветром, причем на разных высотах. Этот механизм возможен только при малом количестве удаляющих аэрозоль атмосферных осадков — дождей или снега. Здесь сочетаются особые для океанов и морей условия терригенной (эоловой) и биогенной седиментации, которые запечатлеваются в составе и свойствах осадочных образований и рассеянного осадочного вещества водной толщи и его концентрированной формы — донных осадков.

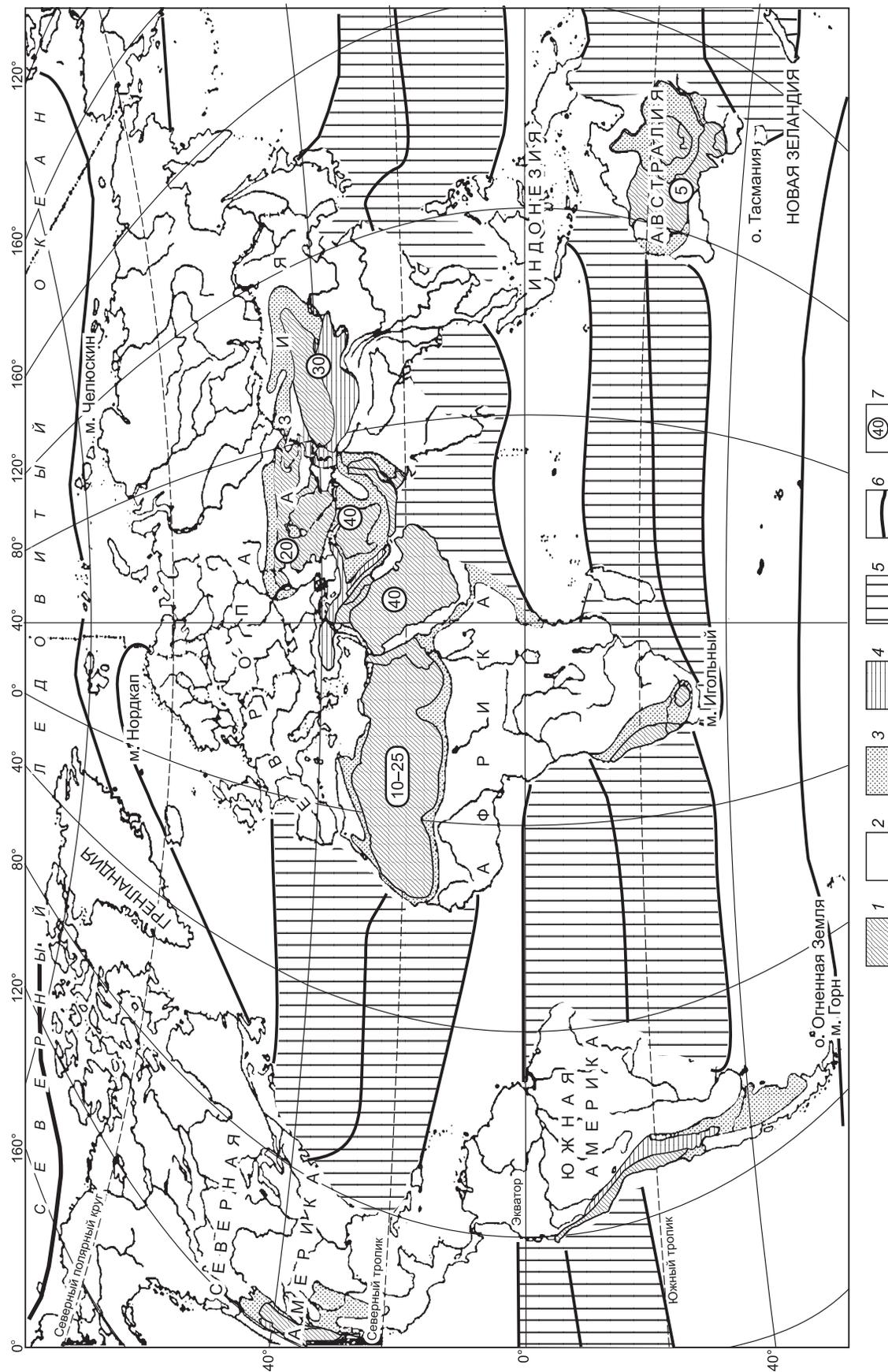


Рис. 5. Схематическая карта аридных и семиаридных зон суши и Мирового океана.

На суше, на питающих провинциях рассеянного аэрозольного вещества и аридных зонах донных осадков выделены: 1 — пустыни тропические и субтропические, 2 — пустыни холодные полярные, 3 — полупустыни, 4 — полупустыни высокогорные и полупустыни высокогорные; 5 — зона морской аридной седиментации; 6 — граница природных зон в океане; 7 — число дней с пылевыми бурями и снижением видимости до < 1 км. Пустыни океана продолжают пустыни суши. Северная и южная аридные зоны разделены экваториальной гумидной зоной.

Впервые удалось определить и сравнить количественное содержание аэрозолей в различных природных зонах океана, в разные сезоны года, на разных высотах в атмосфере. Более того, удалось количественно охарактеризовать вертикальные и горизонтальные потоки этого осадочного вещества над морями и океаном, скорости его выпадения на поверхность вод и далее — включение в потоки осаднения на дно через многокилометровую толщу вод. Установлено, что главная часть аэрозольного вещества существует в виде тонких (обычно меньше 0.02 мм), мелкоалевритовых и пелитовых частиц в концентрациях, невидимых невооруженным глазом.

Эти осадочные частицы разного генезиса являются неременной составной частью земной атмосферы и потоков воздуха в нижних слоях атмосферы, в основном 0—10 км. Это осадочное вещество непрерывно перемещается вместе с воздушными массами по траекториям, которые удается определять разработанным метеорологами методом обратных прокладок, сопоставляя с прямыми наблюдениями. В конечном счете удается устанавливать места как зарождения, так и пути переноса на сотни-тысячи километров, а также места разгрузки воздушных масс от балласта рассеянного вещества.

Рассеянный в атмосфере осадочный материал открывает новые возможности для понимания аридной седиментации в Мировом океане, его места в ряду других источников вещества, а в целом для детального изучения процессов аридной седиментации. Забегая вперед, подчеркнем, что удалось установить, что это не простая аэрозольная добавка к основным видам осадочного вещества (речного, терригенного, биогенного и др.). В аридных зонах — это главная составная часть донных осадков и сейчас, и (по данным бурения) в геологическом прошлом. Можно говорить об особом типе морского (океанского) аридного седиментогенеза. Прямыми исследованиями рассеянного осадочного вещества атмосферы, причем в целом для Мирового океана, удалось установить, что его вклад в осадкообразование близок к вкладу речного и что главная его часть приходится на аридную зону Северного полушария, куда речной и ледовый материал не поступает, а биогенный процесс ослаблен.

Что же представляет собой рассеянный осадочный материал атмосферы с точки зрения седиментологии как источник осадочного вещества, каково реально его количество, состав и свойства, каков вклад в формирование донных осадков аридных зон?

Многочисленные факты дальнего и сверхдальнего переноса природных аэрозолей и загрязнений, в том числе трансокеанского, многократно наблюдались гидрометеослужбами с применением наземных оптических систем, счетчиков частиц, лидаров, радиометров и др. [Uno et al., 2001].

Источниками природных аэрозолей Тихого океана являются высокие плато высотой 1—2 км (пустыни Гоби и Такла-Макан). Далее запыленные воздушные массы («желтый песок» — коса в Японии) проходят над территориями Японии и Кореи и после пересечения Тихого океана снова регистрируются на тихоокеанских берегах США [Jaffe et al., 1999]. Этот золотый материал в настоящее время маркируется загрязнениями промышленности Китая, что приводит к выпадению кислых дождей в подветренных странах (Япония и Корея), а также вызывает беспокойство на другой стороне Тихого океана — в США [Jaffe et al., 1999].

Главный сезон трансокеанского переноса — весна. Значительная часть потока аэрозолей идет на высотах 2—6 км [Uno et al., 2001]. Это частицы диаметром от 0.1 до 20 мкм, т.е. пелит и мелкий алеврит. Трансокеанский перенос подтверждается и обратной прокладкой движения воздушных масс.

Трансграничный перенос загрязнений по воздуху, причем на огромные расстояния — одна из новых проблем века. Она в полном масштабе обрисовалась со времени первых атомных взрывов в атмосфере.

ПИТАЮЩИЕ ПРОВИНЦИИ — АРИДНЫЕ ЗОНЫ СУШИ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С АРИДНЫМИ ЗОНАМИ МИРОВОГО ОКЕАНА. ПРОЦЕССЫ И ТИПЫ

Обычно представления об аридных условиях связаны с зонами пустынь и полупустынь на суше. Переходное положение между аридными и влажными зонами занимают степи. Главная область распространения пустынь в прилегающих к ним семиаридных областях — это тропическая и субтропическая зоны с испарением (испаряемостью), значительно превышающим выпадение атмосферных осадков (см. рис. 2, 3). Существуют районы, где по многу лет не выпадает осадков. Принято считать, что в океане аридные зоны исключаются неограниченными запасами воды [Страхов, 1976]. Морьякам начиная с античных времен известно, что такие зоны без атмосферных осадков или с очень малыми их количествами существуют и в морях, и океанах. За последние годы удалось охарактеризовать их с точки зрения седиментологии — по аэрозольным исследованиям атмосферы, а также количественно по наблюдениям на островах и по данным экспедиционных исследований (см. рис. 2), по рассеянному осадочному веществу атмосферы и водной толщ, концентрированным формам осадочного вещества — зонам осадков.

Таблица 1.

Площади аридных территорий (млн км²) по континентам [Мейзе, 1955]

Континент	Пустыни			Полуаридные области	Всего
	экстрааридные	аридные	всего		
Африка	4.558	7.304	11.862	6.081	17.943
Азия	1.011	7.909	8.920	7.516	16.436
Австралия	—	3.864	3.864	2.517	6.381
Северная Америка	0.031	1.279	1.310	2.657	3.967
Южная Америка	0.171	1.217	1.388	1.626	3.014
Европа	—	0.171	0.171	0.844	1.015
Итого	5.771 (4)*	21.774 (15)	27.515 (19)	21.241 (14.6)	48.756 (33.6)

Примечание. В скобках — процент от поверхности суши.

Как видно из рис. 5, аридные и семиаридные зоны океанов продолжают аридные зоны суши и, так же как и континентальные, располагаются в тропических поясах.

В океанах аридные пустыни выделяются не только по гидрометеорологическим показателям, но и по количеству, составу и свойствам рассеянного осадочного вещества водной толщи и донных осадков.

Для суши главные показатели для пустынь и полупустынь, а также полуаридных областей приведены в табл. 1. Видно, что основные источники аэрозолей Земли располагаются в Северном полушарии (где сосредоточены материковые части литосферных плит). Общая площадь аридных областей питания суши 48.675 млн км², из них большая часть принадлежит пустыням и полупустыням; области питания, т.е. развевания ветрами, объединены в два глобальных пояса, простирающихся между 15° и 35° с.ш. и 10—30° ю.ш., т.е. шириной в 2—2.4 тыс. км (см. рис. 5). По данным ФАО, к пустыням относятся 23 % площади материков.

Пояса эти не сплошные — они разделены океанами, а на суше — горными поднятиями, где (в соответствии с вертикальной зональностью) расположены альпийские луга, а еще выше — холодные пустынные зоны ледников. Кроме температурного фактора и влажности на атмосферу большое влияние оказывает растительность (см. рис. 5).

Травяная и особенно лесная растительность — это природные ловушки аэрозольного вещества. Во время «черных бурь» ранней весной на Северном Кавказе нередко выдувается весь верхний слой почвы. По опушкам насаждений возникают сугробы из почвы, а значительная ее часть уносится в море [Хрусталева, 1978].

Главные источники природных аэрозолей — это пустыни и полупустыни, не закрепленные растительностью, и обычно с сильными ветрами. При сильном солнечном нагреве возникают мощные верти-

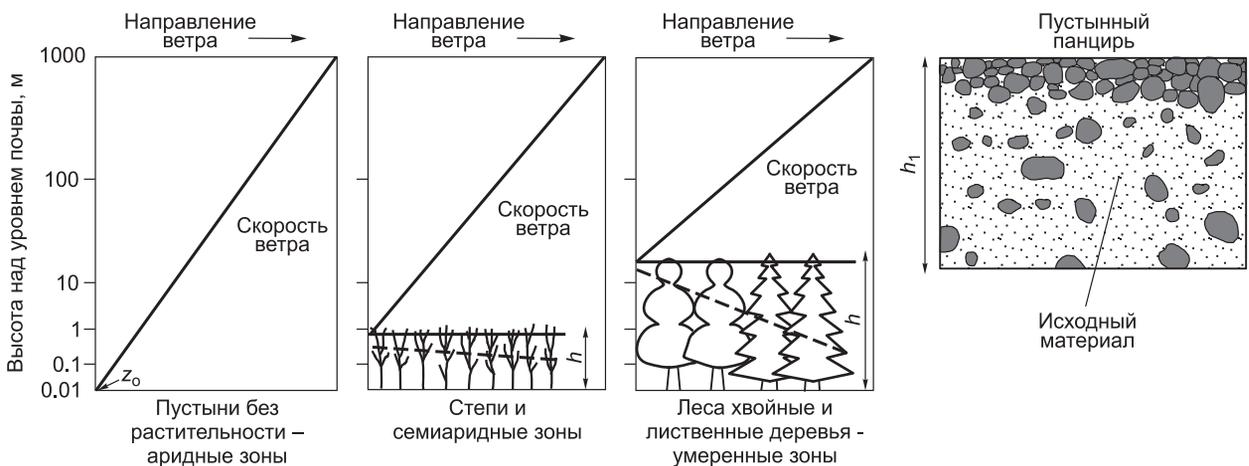


Рис. 6. Защита поверхности почвы от выдувания и природные растительные системы травянистой (степной) и лесной растительности гумидных и семиаридных зон, защитный панцирь пустынь.

Справа высота слоя пылеулавливания. В геологической истории защитная роль растений возникла 500 млн лет назад, когда растения вышли на сушу.

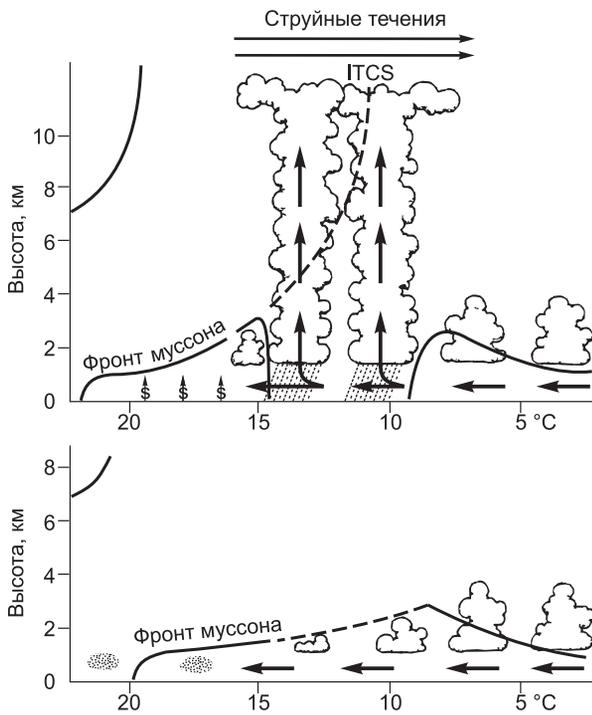


Рис. 7. Один из вариантов превращения горизонтальной части вихря в вертикальный поток до высот 10—15 км.

Подъем аэрозолей на уровень выше облаков в зону струйных течений со скоростью в 300—350 км/ч — начало работы системы дальнего и сверхдальнего (глобального) переноса.

кальные потоки, которые поднимают аэрозольный материал на большие высоты (рис. 6—8) и образуют потоки аэрозольного вещества, которые не только достигают окраин континентов, но и центральных частей океана. Более того, как будет показано, имеет место и постоянный трансокеанский перенос как через Атлантический океан по трассе Северная Африка — Южная Америка, так и через Тихий (трасса Лессовое плато Китая — Япония — берега Северной Америки). В отличие от канализованных речных потоков осадочного вещества, аэрозоли переносятся чаще в форме пылевых облаков разных размеров и разной длительности пребывания в атмосфере. При этом часть эолового вещества проникает и в гумидные зоны. Эти положения подтверждаются дальним перемещением маркированных (радиоактивных) облаков ядерных взрывов в атмосфере (включая и Чернобыльскую аварию), прослеживанием высотных пепловых выбросов ряда вулканических извержений, распределением ДДТ (в годы его применения) и др.

Важное значение имеет высота выброса аэрозолей в атмосферу вихрями, смерчами, взрывными извержениями и взрывами, поскольку с высотой скорость ветра возрастает, а направление в верхних слоях почти постоянное, т.е. существует постоянный вектор переноса вещества в верхней атмосфере, т.е. без вымывания дождями и снегом.

Из всего сказанного можно сделать предположение, что наибольшее количество аэрозолей должно возникать в аридных зонах именно Северного полушария и именно в тропической его зоне. За последние десятилетия удалось не только по отдельным пробам, но и на основе систематических прямых исследований аэрозолей, полученных по единой методике из разных частей океанов, количественно определить потоки аэрозолей над океанами (вертикальные и горизонтальные потоки), их гранулометрический и минеральный составы, геохимию, изотопный состав и др.

Из всего сказанного можно сделать предположение, что наибольшее количество аэрозолей должно возникать в аридных зонах именно Северного полушария и именно в тропической его зоне. За последние десятилетия удалось не только по отдельным пробам, но и на основе систематических прямых исследований аэрозолей, полученных по единой методике из разных частей океанов, количественно определить потоки аэрозолей над океанами (вертикальные и горизонтальные потоки), их гранулометрический и минеральный составы, геохимию, изотопный состав и др.

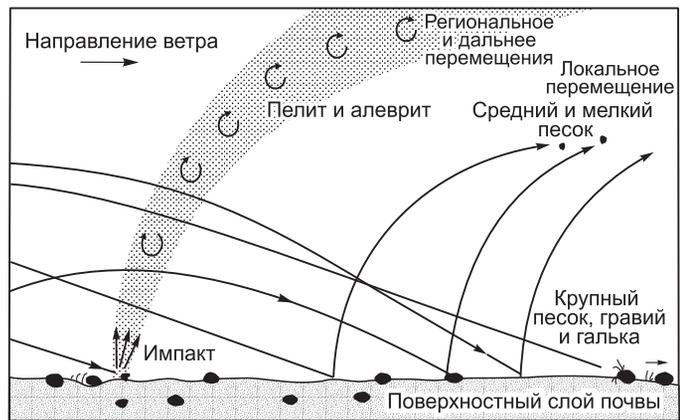
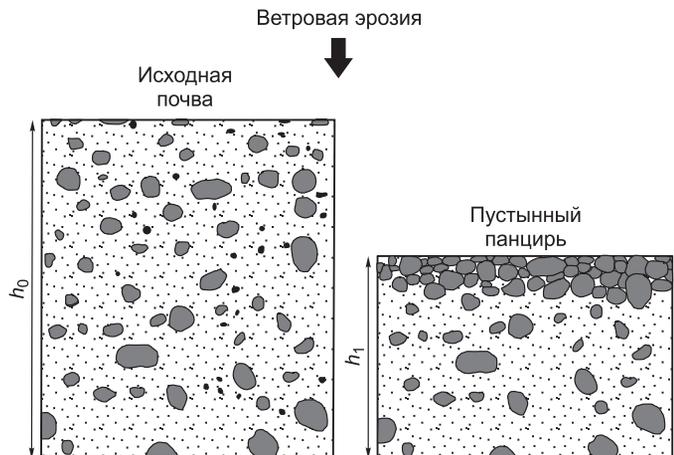


Рис. 8. Воздействие ветрового потока на поверхность почвы, незащищенной растительностью.

Крупные частицы перекаатываются или перемещаются скачками (сальтация). Пелитовые и алевритовые выбиваются крупными частицами (импактный процесс) и выдуваются вихрями. Внизу — образование пустынного панциря при выносе тонких частиц ветром.



КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ПРИВОДНОМ (5—20 м) СЛОЕ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

В ходе более 300 рейсов крупных судов Института океанологии РАН в разные океаны, а также в многочисленных рейсах средних и малых судов в моря, омывающие берега нашей страны, удалось получить огромный материал по распределению, составу и свойствам аэрозольного вещества. Все эти работы проводились нами по единой программе и методике совместно с исследованиями по физике, химии, биологии и донным осадкам. Кроме экспедиционных исследований в дальних частях океанов, в том числе в аридных зонах, проводились многолетние исследования практически во всех морях Арктики (в Белом море 10 лет с охватом всех сезонов). Особенный интерес представляют исследования в единственном в стране водоеме аридной зоны и переходной зоны степей и полупустынь — на Южном Каспии (несколько лет исследований). Привлечены также доступные литературные данные — отечественные и зарубежные.

Удалось сопоставить для сравнения первые карты-схемы для всего Мирового океана по данным сборов нейлоновыми сетками и по сборам методом ультрафильтрации и электронными счетчиками с учетом потоков природных изотопов (^7Be , ^{210}Pb , ^{10}Be). Эти данные для всей территории нашей страны удалось в ряде мест сопоставить с прямыми определениями потоков рассеянных аэрозолей снега (вплоть до южных границ его распространения), а также с прямыми измерениями вертикальных потоков атмосферными ловушками и косвенными наблюдениями за видимостью, дымкой и др.

С точки зрения аридной седиментации наибольший интерес представляет изучение вертикальных потоков аэрозолей, которые сведены на карту-схему (рис. 9). Она дает представление о соотношении источников аэрозолей и их потоков, их зональной приуроченности, а также показывает интенсивность выпадения, характерную для разных зон, генеральные направления перемещения главных масс рассеянного эолового материала. Отметим, что на этой карте показано поступление только минерального, т.е. поступающего с континента, материала (нет морского биогенного вклада).

ЗАХВАТ ИЗ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ И ПОЧВЫ. ЭМИССИЯ РАССЕЯННОГО АЭРОЗОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА

Захват рассеянного осадочного вещества из верхнего слоя континентальной коры воздушными потоками атмосферы затрагивает педосферу, которая включает коры выветривания и почвы. Почва — это корнеобитаемый слой, через который идет взаимодействие с растениями, микроорганизмами, поверхностными и глубинными водами и с атмосферой (через почвенный воздух).

Именно в педосфере идет извлечение растениями элементов из минералов (из кристаллических форм не участвующих в циклах элементов). Это жизнедеятельный слой, где возникает контакт горных пород с внешней средой [Добровольский и др., 2010].

Почва — это биокосное образование, кроме минеральной части в ней огромное значение приобретает органическое вещество — живое или мертвое. Живое вещество включает корневые образования

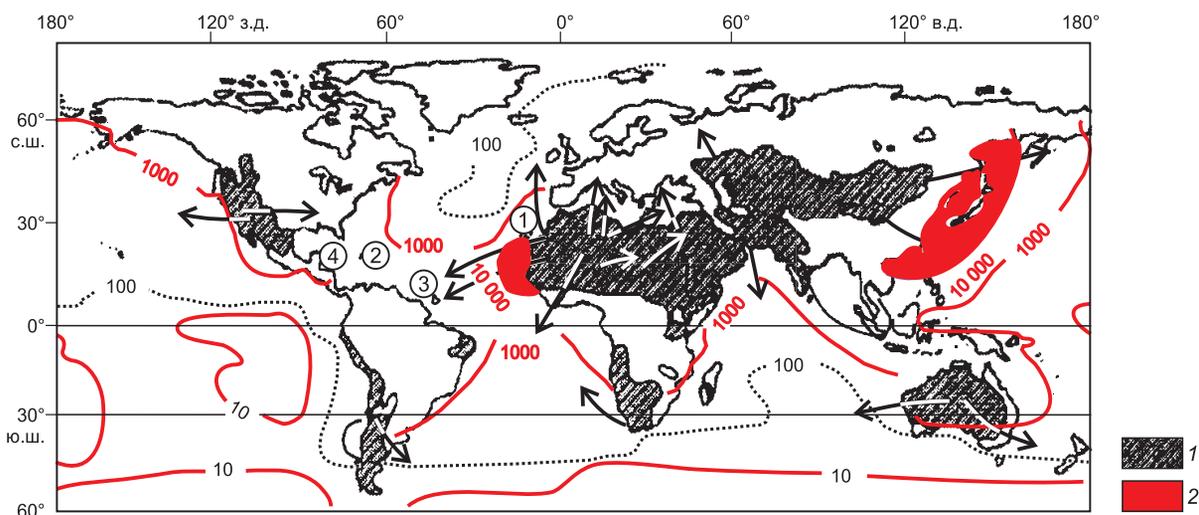


Рис. 9. Основные источники аэрозолей на суше и вертикальные потоки аэрозолей из атмосферы на поверхность Мирового океана ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{год}$) [Duce et al., 1983] с дополнениями автора.

Детали питающих центров суши (область разветвления) (см. рис. 5). Цифры в кружках: 1 — Канарские острова, 2 — Виргинские острова, 3 — о. Барбадос, 4 — Южная Флорида; 1 — главные аридные зоны (области поставки аэрозолей на суше) (см. рис. 5), 2 — интенсивность выпадения потоков в океане — вертикальные потоки аэрозолей ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{год}$). Выделены области максимального выпадения (красная заливка) и изолинии интенсивности вертикальных потоков аэрозолей в океане.

высших растений, причем это не только образования, обеспечивающие поступление почвенных растворов и воды, но и потоки от корней к кронам. Корневые отростки вступают в симбиоз с грибами и симбиотическими бактериями, которые выполняют главную работу по переводу элементов в растворимые, т.е. усваиваемые растениями формы. Сосудистые растения состоят из лигноцеллюлозы, в ходе ее разложения образуется почвенный гумус — стойкая форма органического вещества.

Крупность частиц почвы (структура) определяется сочетанием ряда факторов. Эти частицы обычно представляют собой агломераты из водопрочных агрегатов разных размеров, скрепленных микроорганизмами, а также бактериальными слизями на корневых волосках, мицелиями грибов, нередко образующими хлопья («войлок»).

Корни растений располагаются в основном в верхнем слое почвы, обогащенном растительным опадом, поток которого составляет для леса 200—800 г/м²/год, а для травянистых систем 100—300 г/м²/год [Заварзин, 2004]. Численность микроорганизмов тесно связана с расстоянием от поверхности корня — от 120 млрд/см³ на удалении 0—1 мм от поверхности корня до 13 млрд/см³ в 15—20 мм от его поверхности.

Грибы и бактерии почвы имеют огромное значение для питания растений, т.е. для возникновения мощного потока элементов от корней к кронам с дальнейшим испарением через поры листьев. Это растительные бионасосы суши.

В слое опада (нисходящий поток растительного вещества) идет разложение древесины (лигноцеллюлозы), в котором главное значение имеют грибы-ксилофаги (до 90 % разлагаемой древесины). Грибная масса замещает древесную.

При взаимодействии почвы и подвижного приземного слоя атмосферы (разной скорости перемещения и продолжительности) происходит переход во взвешенное состояние все большего количества частиц почвы, не закрепленных растительностью или почвенной влагой (см. рис. 8). При незначительных скоростях происходит перекачивание частиц по поверхности и их движение скачками (сальтация). При дальнейшем усилении скорости ветра все большее время частицы находятся в воздухе и, наконец, теряют связь с почвой и переходят в атмосферную взвесь — рассеянный осадочный материал атмосферы (аэрозоль). Большое значение имеет еще и импактный фактор — выбивание частиц с поверхности почвы ударами более крупных частиц. При порывистом ветре частицы проходят все стадии отделения от поверхности (см. рис. 8).

Огромное значение для устойчивости почвенного покрова к воздействию ветра имеет растительность. Древесная растительность не только защищает поверхность почвы от развеивания, но и улавливает значительное количество аэрозолей из нижних слоев атмосферы (см. рис. 6).

Травянистая растительность степей также является сильной защитой, но только для времени вегетации растений. Она отключается после отмирания травяного покрова осенью. В пустынях такая защита отсутствует или ничтожна, поэтому это главные области развеивания, постоянной поставки рассеянного вещества в атмосферу. Наибольшее значение для развеивания играет здесь (при прочих равных условиях) увлажненность поверхностного слоя, а в ряде мест также снежный покров, который оказывает защитное действие.

Наличие травяного покрова особенно большое значение имеет в семиаридных зонах (степи), в особенности в местах распашки почв (зоны прерий, черных земель, целинных земель). Здесь весной и поздней осенью возникают условия, когда растительность исчезла, а снег еще не выпал и верхний слой почвы не закреплен ни растениями, ни морозом. Сильные ветры, возникающие в это время, захватывают нередко весь пахотный слой (до 10—20 см) почвы и переносят его на расстояния в десятки и сотни километров. Сходное стечение обстоятельств отмечается и в весенние месяцы. Распашка земель резко усиливает развеивание почв, поскольку защитный растительный покров оказывается нарушенным.

Таким образом, очерчивается область питания атмосферы осадочным рассеянным веществом — зоны аридные и семиаридные. Две другие области, где почвенный покров оказывается на некоторое время не защищенным растительностью — прибрежные пляжи с дюнами и области, освобождающиеся от ледниковых покровов при отступании ледника (моренный материал, также не защищенный растительностью). Прибрежные области эмиссии приобретают огромное значение в периоды глобального снижения уровня Мирового океана. При снижении уровня на 120 м при последнем оледенении открывается область эмиссии площадью около 30 млн км² прибрежных рыхлых отложений, что соответствует площади всей Африки. В межледниковья уровень океана повышается и эти дополнительные области развеивания оказываются под водой. Эта схема подтверждается бурением ледников Гренландии, Антарктиды и горных ледников, а также данными по бурению озер и болот. При понижении уровня океана на 100—150 м (при оледенениях) запыленность атмосферы возрастает в 3—5 раз.

Лессы — континентальные четвертичные (и более древние) аэрозольные отложения, занимающие около 3.2 % поверхности суши [Лессовый покров..., 2001], а также значительную часть поверхности дна морей. Вопрос о распространении лессов или лессового материала в океанах и морях долгое время

не рассматривался, поскольку здесь эти осадочные отложения обычно разбавляются биогенным и флювиогенным материалом и выделяются только при углубленных исследованиях.

Только детальные исследования донных осадков Атлантического и Тихого океанов, а в последние годы и прямые исследования аэрозольного материала над поверхностью океанов и морей (а также почв островов, возвышающихся над поверхностью океанов, прямые исследования снега и льда) показали, что морские лессовые отложения и рассеянный лессовый материал имеют широкое распространение и приурочены, как и на суше, к определенным климатическим поясам Земли, т.е. их распространение в Мировом океане подчиняется законам зональности [Лисицын, 1978].

Площадь распространения лессов на континентах составляет, по разным определениям, от 3.0 % до 4.0 % поверхности суши, т.е. 4.255 млн км², причем главная часть сосредоточена в Европе и Азии (по 33—34 %) [Лессовый покров..., 2001].

Обычно связывают распространение лессов с аридными условиями, однако главная их часть приходится на умеренную зону (около 80 %) и только около 20 % — на субтропическую и тропическую. В Южной Америке картина обратная, около 72 % лессов расположено в субтропической зоне. Таким образом, лессы, по современным представлениям, — континентальные отложения, характерные для умеренной лесостепной и степной зон.

Верхняя граница их распространения, по которой можно судить о высотных уровнях переноса рассеянного осадочного материала ветром, в Европе до 1500 м, но в Азии достигает 4500 м и больше.

В Европе для лессов характерно островное их распространение в южной части и сплошное — в восточной. В Азии обширное поле их распространения расположено среди пустынь (лессовое плато Китая). Это один из важнейших источников эолового материала для северной части Тихого океана. Здесь мощность толщи лессов достигает 200 м и более. В Африке лессы распространены в виде разрозненных пятен, основная часть тонкого осадочного материала пустынь переносится здесь ветрами на запад — через океан до берегов Северной Америки и на север — в Средиземное море и Южную Европу.

Многочисленные исследования показали, что для развития эрозии ветром и дальнейшего переноса осадочного вещества атмосферными потоками (ветром) необходимо сочетание нескольких условий.

1. Развеиваемый осадочный материал должен быть рыхлым и не закреплен растительностью в верхнем слое почвы (травянистый, кустарниками или лесом).

2. Верхний слой рыхлых отложений должен быть сухим, легко развеиваемым, поэтому аридные зоны — главные источники аэрозолей.

3. Ветры должны быть достаточной силы для срыва частиц и их перемещения.

4. Можно говорить о локальной, дальней и сверхдальней дифференциации переносимого вещества по крупности частиц.

5. Частицы песчаной фракции (крупнее 0.1 мм) и часть крупных алевритов перемещаются перекачиванием или сальтацией и остаются в пределах зоны локального и регионального переноса [Hagen et al., 2010]. Более мелкий материал (0.1—0.05 мм), т.е. крупный (частью мелкий) алеврит, входит в состав почв эоловой природы. Самый тонкий (0.02 мм) (а при порывах ветра и часть крупного алеврита) материал — это главная часть фракций дальнего переноса. Именно он улавливается в основном в аэрозолях, получаемых из приводного слоя морей и океанов в экспедициях на островах и в ледниках.

Локальный перенос (перекачиванием частиц и агрегатов в поверхностном слое, а при усилении ветра — сальтацией) — перемещение с подскоками (наиболее обычны для песчаной и более крупной (дресва, щебень) фракций). Частицы с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм удаляются ветром за пределы локального ареала, т.е. в первом приближении на удалении менее 10 км, реже до 300 км (локальный и региональный перенос).

Для переноса частиц ветром важны не только средние скорости ветра за месяц, год или столетие, но и максимальные (штормовые) скорости, которые возникают на протяжении нескольких дней, а иногда и часов в году — штормовые, катастрофические скорости.

Кроме этих пиковых значений, определяющих контуры ареала рассеяния вокруг пустыни из песка или щебня, важны и сезонные максимумы при перестройке потоков ветра — весной и осенью, смены муссонов летних на зимние и др.

При резком усилении ветра и при попадании аэрозолей в верхние слои атмосферы (смерчи, торнадо и др.) иногда возникают условия для переноса более крупных частиц, чем те, что переносятся при обычной погоде. В разрезе лессов это отмечается по появлению прослоев крупного алеврита и даже песка.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА И ЗОНЫ ОКЕАНСКОЙ (МОРСКОЙ), АРИДНОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ

Многолетние прямые исследования количественного распределения аэрозольного рассеянного осадочного вещества в нижних (приводных) слоях атмосферы позволили получить первые важные для седиментологии результаты.

Прежде всего, следует отметить, что за последние 30 лет удалось разработать несколько независимых методов изучения не только качественного состава, но и начать количественные исследования, которые позволяют оценить даже ничтожное содержание аэрозолей в атмосфере над океанами.

Удалось установить среднее для атмосферы над Мировым океаном (фоновое) содержание — около 0.01 мкг/м^3 . В ряде мест эта концентрация повышается в сотни и тысячи раз. Самые крупные участки высоких концентраций — это аридные зоны, опоясывающие земной шар, т.е. тропические и субтропические природные зоны к северу и к югу от экватора, два огромных пояса в интервале широт $10\text{—}30^\circ$.

Эти пояса неправильной формы, они зависят от рельефа и распределения материков в Северном (континентальном) и Южном (морском) полушариях. Разделены они экваториальной гумидной зоной — внутритропической зоной конвергенции (ВТЗК).

Аридные пояса, в общем, совпадают с зонами пассатных ветров. В Северном полушарии пассатные ветры направлены с северо-востока, в Южном — с юго-востока. Примечательно и то, что главные области подготовки аэрозольного материала — области пустынь, полупустынь и частично степей расположены в тех же природных зонах (см. рис. 4, 5) и на суше, и в океане, а также на островах, нередко удаленных от суши на тысячи километров, где существуют характерные для суши аридные условия.

На суше — это области, почти лишенные защитного растительного покрова, они, так же как и в океане, образуют два пояса по обе стороны от экватора.

Главный пояс в Северном полушарии включает Сахару и протягивается на тысячи километров на восток, заканчиваясь на лессовом плато Китая. Это Африкано-Азиатская главная область питания для рассеянного вещества атмосферы, ее общая площадь 17.94 млн км^2 . Она обычно делится на африканскую часть (пустыня Сахара) и азиатскую с приподнятыми над уровнем моря плато и горными сооружениями Восточного Китая (лессовое плато) (см. табл. 1).

Следующая по площади аридная область питания располагается в Южном полушарии. Это пустыни Австралии, где они занимают 44% материка. Далее в Южном полушарии следуют пустыни Южной Африки и Южной Америки (см. рис. 5). Область пустынь и полупустынь Северной Америки протягивается от Мексики вдоль Тихоокеанского побережья до пустыни Мохаве на севере. Все эти природные области пустынь и аридного климата континентов продолжают в моря и океаны. Именно здесь существуют особые для океанов и континентов условия подготовки, транспортировки и отложения рассеянного осадочного вещества — определяется его количество, состав и свойства, причем вещества как абиогенного (минерального), так и биогенного.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ

Максимальные содержания аэрозолей обычны в нижних слоях атмосферы, особенно близ источников, в областях с сильными ветрами и восходящими потоками, которые поднимают осадочный материал до горизонта струйных ветров, т.е. на высоты дальнего и сверхдальнего переноса.

В пределах этих двух океанских аридных поясов Северного и Южного полушарий проведены тысячи прямых и дистанционных измерений концентрации аэрозолей (пока в основном для приводного слоя и слоя от 0 до 30 м от поверхности моря).

Удалось установить, что концентрации меняются во времени в одном и том же месте на протяжении года (по годам, сезонам и более коротким отрезкам времени). Многолетние исследования (в том числе и в открытом океане) на одной из океанологических станций показали, что поток аэрозолей менялся по величине от года к году до 10 раз [Клювиткин и др., 2004], т.е. имеются значительные межгодовые изменения.

От значений концентраций аэрозолей можно перейти к горизонтальным (под действием ветра) потокам и вертикальным (под действием силы тяжести) потокам аэрозольного вещества. Было показано, что в пелагиали океанов (вдали от источников) средняя скорость осаждения частиц аэрозолей составляет около 2 см/с . Скорости горизонтальных потоков, как отмечалось, достигают первых сотен км/ч. Потоки эти турбулентные, т.е. имеют вертикальную составляющую, обеспечивающую дальний перенос при больших скоростях ветра и при отсутствии атмосферных осадков (дальний перенос — верхние слои выше облаков).

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ АТМОСФЕРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ

Потоки аэрозолей (их минеральной части) рассмотрим на разрезе Ла-Манш — Кейптаун. В аридной зоне (северной) они были определены в пределах от $0.4\text{—}0.8$ в гумидной зоне до $7.8\text{—}16.6 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ в аридной [Клювиткин и др., 2004, 2009; Клювиткин, 2008, 2009]. На карте (см. рис. 9) потоки даны в $\text{мг/м}^2/\text{год}$, т.е. в 365 раз больше. Для Атлантического океана лаборатория физико-геологических исследо-

ваний ИО РАН провела более 10 попутных рейсов на квазимеридиональных пересечениях через Атлантику по маршрутам Ла-Манш — Кейптаун и Ла-Манш — Монтевидео.

Полученные данные по концентрациям аэрозолей были пересчитаны на средние годовые значения, которые оказались близкими к определенным для тех же месяцев в рейсах НИС «Академик Вавилов», «Академик Иоффе», «Академик Мстислав Келдыш», «Академик Федоров». Во всех этих рейсах удавалось получить материал аэрозолей не только из северной, но и из южной аридных зон (для весенних и соответственно осенних месяцев Северного полушария).

При работах на полигоне в районе Срединного хребта Атлантики размером 10×10 миль удалось установить значительную изменчивость содержания аэрозолей аридной зоны во времени: за 20 сут они менялись от 1.5 до 65 мгк/м³, т.е. почти в 50 раз. Это подтверждается и значительными контрастами изменения концентраций во времени при наблюдениях на океанских островах (см. ниже). Графики концентрации за год характеризуются для всех океанских островов такой же резкой и быстрой изменчивостью, но при этом всегда выделяется месяц (или несколько недель) с максимальными содержаниями — «пылевые паводки» аэрозольного рассеянного осадочного вещества.

Изменение концентраций аэрозольного материала на квазимеридиональном направлении (пересечение Ла-Манш — Кейптаун) [Клювиткин и др., 2004] для июня 2001 г. показывает максимум близ осевой части аридной зоны (30° с.ш.). Здесь особенно увеличился вклад минеральной, т.е. терригенной части вещества, которое было изучено в деталях [Лукашин и др., 1994, 1996, 2000, 2002; Клювиткин, 2008; Клювиткин и др., 2009].

По этим же разрезам проводилось определение содержания взвеси в водной толще и с поверхности, а также в донных осадках, т.е. прослежен весь путь от рассеянного осадочного вещества атмосферы — через взвесь всей толщи океанской воды (до 4—5 тыс. м) и до толщи концентрированных донных осадков.

Оказалось, что обычно в аридной зоне вертикальные потоки рассеянного аэрозольного материала близки к вертикальным потокам водной морской взвеси с поверхности океана, т.е. имеют главное значение для осадконакопления. Близок также их минеральный и химический состав, гранулометрия и другие свойства рассеянного вещества. В других природных зонах для верхнего слоя воды типично преобладание биогенного вещества (до 90—95 % на поверхности).

Таким образом, в аридных зонах вертикальный поток рассеянного аэрозольного вещества является главным для поверхностного слоя вод; он сохраняется (в минеральной части) и для глубинных слоев, и это соответствие достигает верхнего слоя донных осадков [Лисицын, 1978; Клювиткин и др., 2004]. Во многих случаях вертикальный поток водной взвеси оказывается выше значений аэрозольного потока, что связано с вкладом биогенной части морской взвеси. Биогенная составляющая самих аэрозолей в аридных зонах обычно не более 10—20 % от общего потока рассеянного осадочного вещества, за исключением сезонов выпадения спор и пыльцы наземных растений в областях локальных выпадений.

Итак, для аридных зон характерно резкое преобладание в составе рассеянного вещества литогенного материала, которое сохраняется и в составе водного рассеянного вещества (взвеси), и донных осадков (концентрированной формы осадочного вещества).

Методом обратных прокладок удается установить места захвата аэрозольного вещества на суше и трассы переноса над океаном (при уровнях 15 и 850 мбар идет основной локальный и региональный перенос). Траектории переноса из Африки в Северную Америку через Атлантический океан многократно изучались в особенности для сезона главного переноса (зимне-весенний Северного полушария) (см. далее).

ПРИРОДНЫЕ ЛОВУШКИ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА

Применение даже самых совершенных приборов для улавливания эолового вещества в экспедиционных рейсах дает представление об одномоментном состоянии процесса — содержании, составе и свойствах. Однако наблюдения, сделанные на протяжении нескольких часов, не дают представления об изменениях, происходящих в той же точке в остальную часть года и тем более не дают надежного среднего значения для нескольких лет, десятилетий и столетий.

Исследования, проведенные со спутников, к сожалению, не дают осадочного материала — проб для исследования вещественного состава и свойств аэрозолей. Между тем, наряду с экспедиционными исследованиями, удастся найти целый ряд природных ловушек аэрозолей, которые, в отличие от экспедиций, работают годы и столетия, в которых материал не загрязнен местными аэрозолями или эти загрязнения могут быть учтены.

Такие природные ловушки имеются как в море, так и на его берегах, как в приводном слое, так и на высоте 6—8 тыс. м.

Природные ловушки в море — это океанские острова, удаленные от суши на сотни и тысячи километров и возвышающиеся над уровнем моря. Они защищены от речного материала и водных взвесей,

Таблица 2. Вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества атмосферы (г/м²/год), по наблюдениям на островах Тихого океана [Lawrence, Neff, 2009]

Остров	Среднее значение потока аэрозолей
Норфолк (Австралия)	0.64
Мидуэй	0.60
Алеутские острова	0.60
Эниветек (Маршалловы острова)	0.44
Оаху (Гавайские острова)	0.42
Новая Каледония	0.37
Науру	0.23
Роратонго (о-ва Кука)	0.21
Самоа	0.15
Новая Зеландия (Северный остров)	0.14
Острова Лайн (о. Фанинг)	0.09

биогенных компонентов аэрозоля, а также от брызг и частично от морских солей. Здесь возможны длительные (месяц-год и больше) непрерывные наблюдения с помощью приборов, установленных с наветренной стороны острова вдали от поселений, поднятых над приземным слоем на мачтах или вышках. Уникальна возможность получения здесь средних значений (не только кратковременных, но и для десятков и сотен лет) путем изучения островных почв. Обычно почвы здесь состоят из местных продуктов выветривания, карбонатных построек (риффы, атоллы) или океанских базальтов и аэрозолей регионального или глобального разноса. Таким образом, на островах могут быть сделаны как мгновенные исследования (на экспедиционном судне), так и более длительные, по сезонам года, по анализу разрезов почв, а также по средним годовым и средним многолетним значениям.

Прямые исследования на о. Барбадос в Атлантике впервые начали А. Делани и Дж. Просперо [Delany et al., 1967; Prospero, 1968]. Далее они были расширены для большой группы островов, лежащих на линии

юго-западного переноса аэрозолей Африки (от островов Сал, Зеленого Мыса до Флориды) (см. рис. 10—16). Затем были получены достаточно надежные пробы с других морских и океанских островов (рис. 17, 18, табл. 2). Методом аэрозольных островных обсерваторий удалось не только получить надежные средние годовые значения потоков рассеянного аэрозольного материала, но изучить их изменения по сезо-

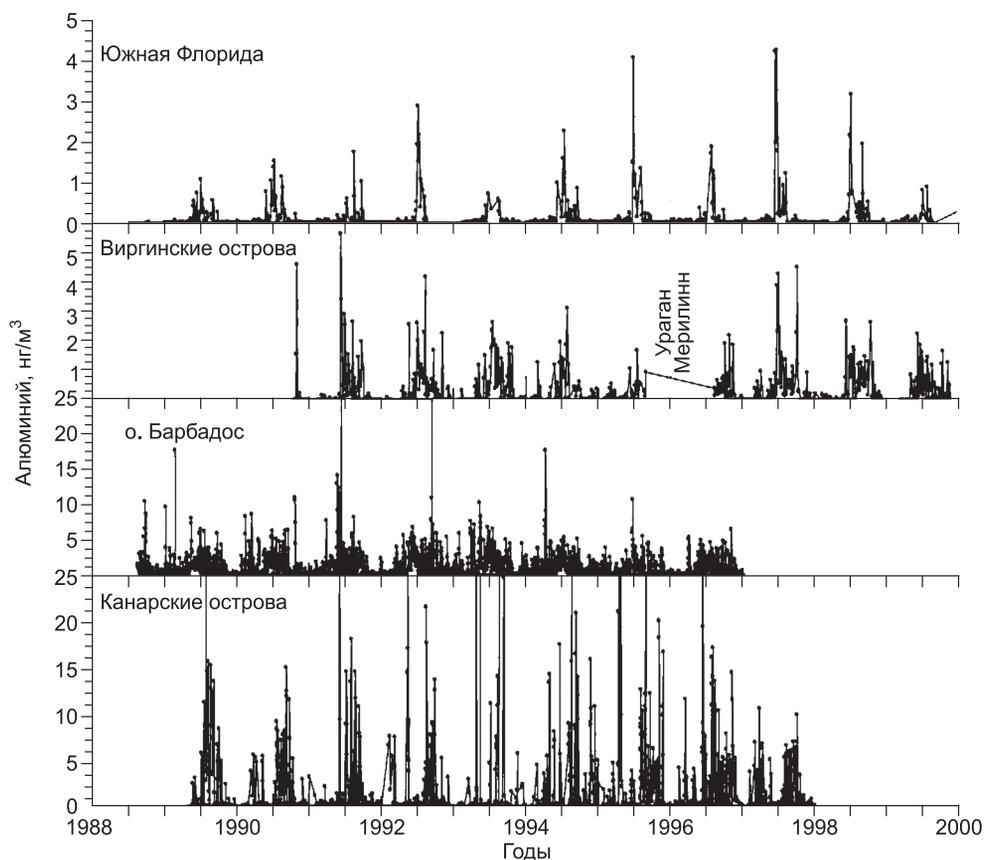


Рис. 10. Поступление аэрозольного материала в океан по данным изучения атмосферных аэрозолей на островах.

Разрез от берегов Африки (Сахара) — Канарские острова — побережье США (Южная Флорида). Трансокеанский перенос. Одновременные исследования на протяжении 12 лет (1988—2000 гг.) [Holmes, Miller, 2004].

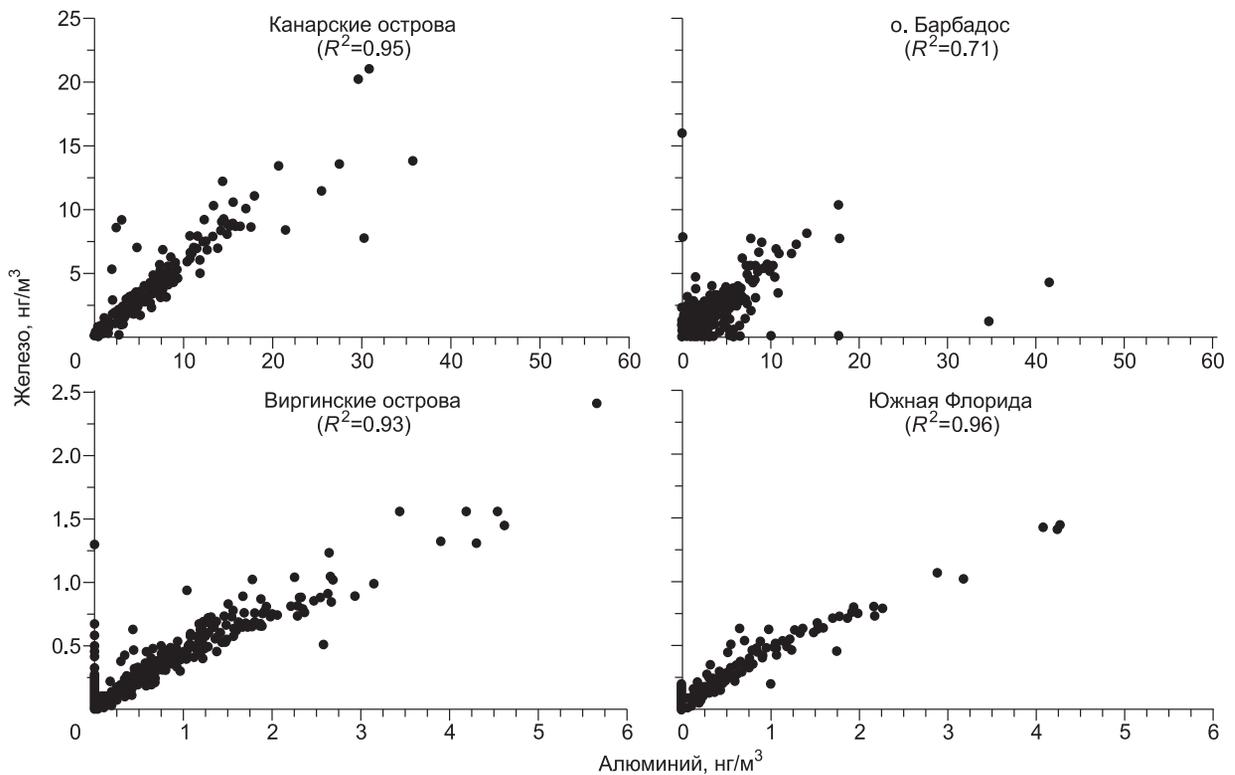


Рис. 11. Сравнительная геохимия рассеянного аэрозольного вещества с островов на разрезе Сахара—Флорида, отношение Fe/Al в аэрозольном материале [Holmes, Miller, 2004].

Одно из доказательств единого источника аэрозолей (Сахара) на всем протяжении трансокеанского разреза — потоки аэрозолей над островами Северной Атлантики.

нам за 10 лет и более (по почвам) (см. рис. 13), выявить трассу западного и юго-западного переноса аэрозолей.

В обсерватории Мауна-Лоа (Гавайские острова) на высоте 3400 м над уровнем океана аэрозоли, поступающие с дальним переносом из Азии, изучались на протяжении четырех лет (1979—1983) [Par-rington et al., 1983].

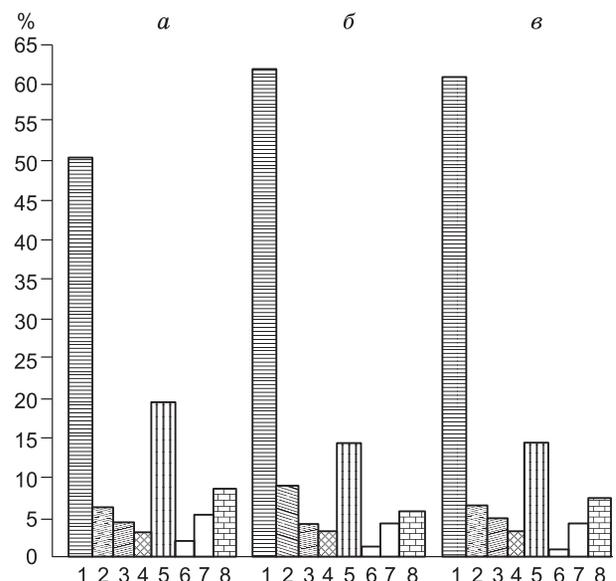
В качестве элемента-маркера континентальной пыли обычно используют алюминий, на основании его содержания можно судить о вкладе терригенной составляющей (среднее содержание Al в земной коре, по Тейлору, 8.23 %, фактор пересчета 12.15), а индикатором поступления морской части аэрозоля (соли) является натрий.

Как видно из рис. 10—14, поступление аэрозоля резко меняется во времени. Четко видна для континентальной пыли одна и та же закономерность: резкое возрастание поступления континентальной пыли из Сахары имеет место весной, с февраля до мая, с пиковыми значениями в конце

Рис. 12. Сравнительная минералогия аэрозолей с островов на разрезе Сахара—Флорида [Glaccum, Prospero, 1980].

а — о-ва Зеленого Мыса, *б* — о. Барбадос, *в* — Майами (штат Флорида, США).

1 — отношение слюда/иллит; 2 — каолинит; 3 — хлорит; 4 — монтмориллонит; 5 — кварц; 6 — микроклин; 7 — плагиоклаз; 8 — кальцит.



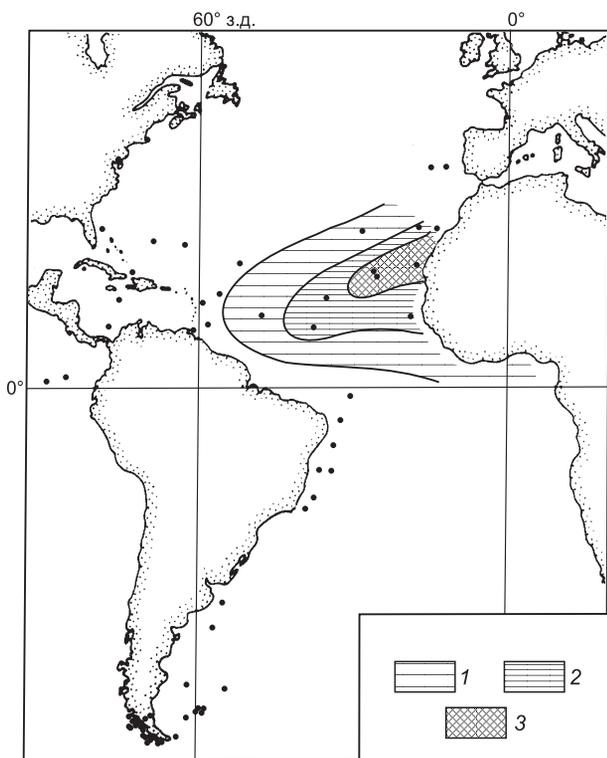


Рис. 13. Распределение кварца в аэрозолях северной аридной зоны Атлантического океана (%) в приводном слое, данные судовых наблюдений [Серова, 1988].

1 — менее 1; 2 — от 1 до 5; 3 — более 5.

апреля—начале мая. В это время концентрация алюминия повышается с 6.7 нг/м^3 обычных для «беспылевых месяцев» (июнь—январь) до средних для «пылевых месяцев» значений 71 нг/м^3 (с максимумом в отдельные дни до 200 нг/м^3).

Используя коэффициенты пересчета на терригенный материал, можно определить, что в «беспылевые» месяцы содержание терригенного материала составляет 81 нг/м^3 , а в пылевые в среднем 862 нг/м^3 , а в отдельные дни до 2430 нг/м^3 !

Меняются средние значения содержания алюминия (и, следовательно, терригенного вещества) также от года к году — от максимального 115 нг/м^3 до минимальных в 57 нг/м^3 в 1980 г. (для пылевых месяцев). Наименьшие отклонения наблюдаются для месяцев без пыли — от 5.3 до 8.2 нг/м^3 .

При работе на островах неизбежно возникает вопрос о возможности загрязнения проб местным аэрозольным материалом. Особенностью базальтов, слагающих Гавайские острова, является резкое отличие отношения Ti/Th (16300 для островов против 590 для континентальных пород), что является одним из маркеров для выявления вклада эолового вещества, принесенного с континента.

Расстояния до ближайших источников аэрозольного материала от Гавайских островов: 3800 км от берегов Северной Америки и более 6000 км от берегов Японии, т.е. это рассеянный осадочный материал дальнего и сверхдальнего переноса.

Необычно высотное положение обсерватории Мауна-Лоа позволило вести наблюдения из слоя, расположенного выше инверсии (при пассатных ветрах она возникает на высоте 1800 м). Эта инверсия,

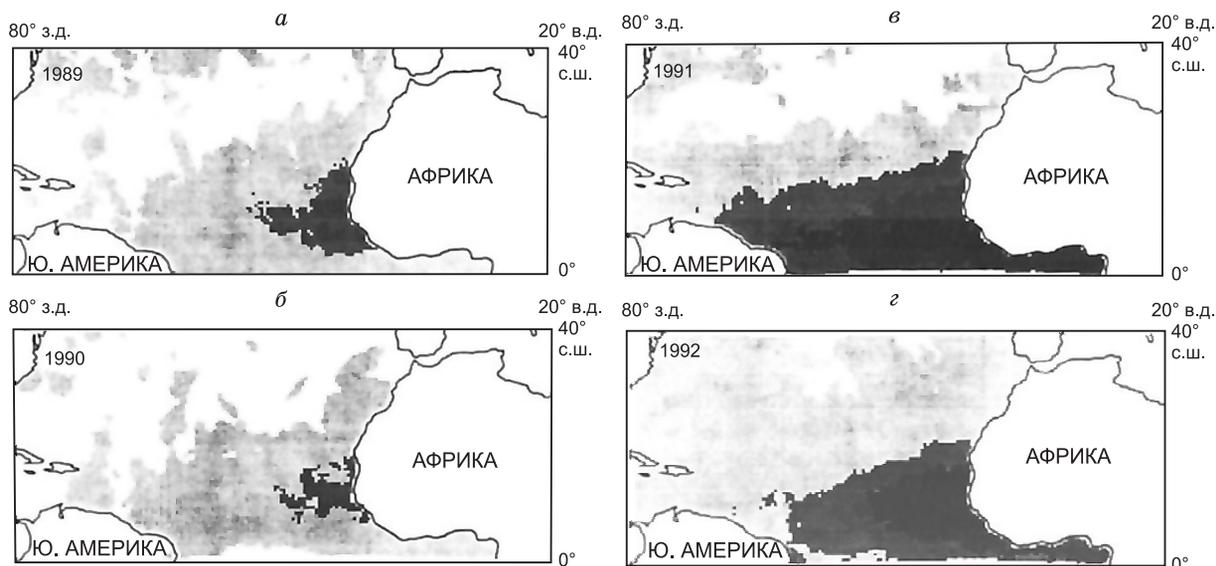
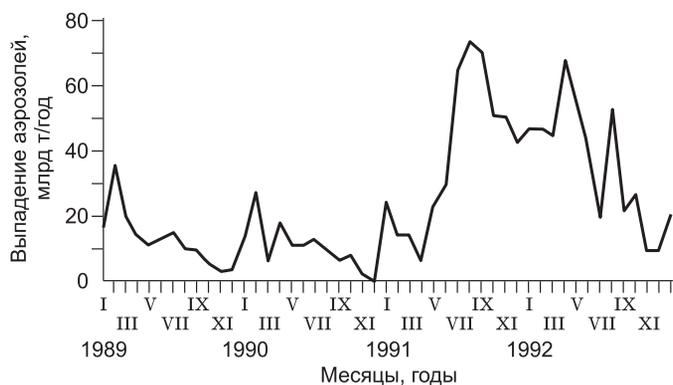


Рис. 14. Трансатлантический перенос аэрозолей по данным наблюдений со спутников на мегаполисе Северная Атлантика площадью 26 млн км^2 по годам (1989—1992) [Swap et al., 1996].

Общая масса аэрозолей в области переноса меняется по годам: в 1989 г. — 150 млн т , 1990 г. — 130 млн т , 1991 г. — 460 млн т (извержение влк. Пинатубо), в 1992 г. — 410 млн т . Главный перенос отмечался с февраля до апреля.

Рис. 15. Ежемесячное выпадение аэрозолей Сахары в северной части Атлантического океана по данным непрерывных спутниковых наблюдений на протяжении четырех лет [Swap et al., 1996].

Выделяются выпадения аэрозольного осадочного вещества в 1992 г.



так же как и в северном трансатлантическом переносе, резко сокращает возможность перемешивания и, таким образом, способствует дальнему (региональному) распространению аэрозолей.

Удалось установить несколько важных закономерностей:

1. Перенос рассеянного осадочного вещества прослеживается на расстоянии более 5 тыс. км, т.е. может быть изучен не только местный, но и региональный (10—1000 км), а также дальний (более 1000 км), трансокеанский, золовый перенос. Это свидетельство самого дальнего перемещения осадочного вещества по воздуху над океаном.

2. Обращает на себя внимание, что во всех случаях за 12 лет наблюдений в Северной и Тропической Атлантике максимумы содержания пыли на островах совпадали с пылевыми бурями в Африке с запазданием 5—7 сут, а сами облака аэрозолей нередко просматривались со спутников, т.е. в движении.

3. На протяжении каждого года наблюдений обычно имеет место один максимум — «пылевая буря», «пылевой паводок» и многочисленные второстепенные, отвечающие более слабым пылевым бурям. По литературным данным, максимум пылевых бурь с видимостью < 1 км определен в Иране (80.7 дней), Аравии, Средней Азии, Сирии — 40 дней. На лессовом плато Китая более 30 дней, в Северной Африке 10—25 дней, Австралии 5 дней. На Южной Украине и в р-не Аральского моря — 20 дней; в гумидных зонах < 1. Число пылевых бурь коррелирует с дефицитом атмосферных осадков [Руч, 1987].

4. Содержание минеральной (преобладающей) части аэрозолей во всех случаях четко коррелирует с содержанием алюминия, а химический состав близок к среднему для верхнего слоя континентальной коры. Эта близость возрастает с ростом дальности переноса, когда теряются индивидуальные особенности, характерные для региональных и, особенно, локальных аэрозолей.

5. Удалось установить, что аэрозоли, поступающие из Африки, содержат заметные количества биогенных элементов (N, P), что отражается на экологии островов, а также «удобряет» леса Бразилии, фитопланктон Мексиканского залива и планктон по всей трассе потока.

6. Установлены необычные для аэрозолей высокие содержания ртути и мышьяка, что связывают с лесными пожарами в Африке.

7. Изучение минерального, химического и изотопного составов аэрозолей и почв океанских островов однозначно показало, что они содержат минералы, «запрещенные» для местной океанской коры (кварц, кислые полевые шпаты, калиевые слюды и другие), а также минералы-маркеры Сахары.

Мировой океан в изучении осадочных процессов и геохимии внешней газовой оболочки (геосферы) Земли имеет уникальное значение, поскольку вся его водная поверхность — это глобальная ловушка (планшет) для золового материала атмосферы (и взвешенной, и растворенной части). Это природный планшет площадью 71 % от поверхности планеты, улавливающий из атмосферы не только аэрозоли, но

и растворенные формы элементов. Здесь золовый материал смешивается с водной взвесью и включается в осадочные процессы, т.е. включается в вертикальные и горизонтальные потоки вод и постепенно опускается на несколько километров вглубь, на дно (рис. 17, 18). В аридной зоне Атлантики удалось уста-

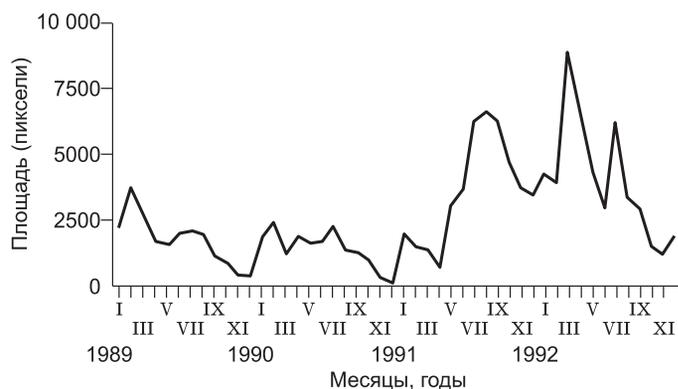


Рис. 16. Площадь распространения аэрозольного вещества по данным спутниковых наблюдений в Северной Атлантике за четыре года (см. рис. 15) [Swap et al., 1996].

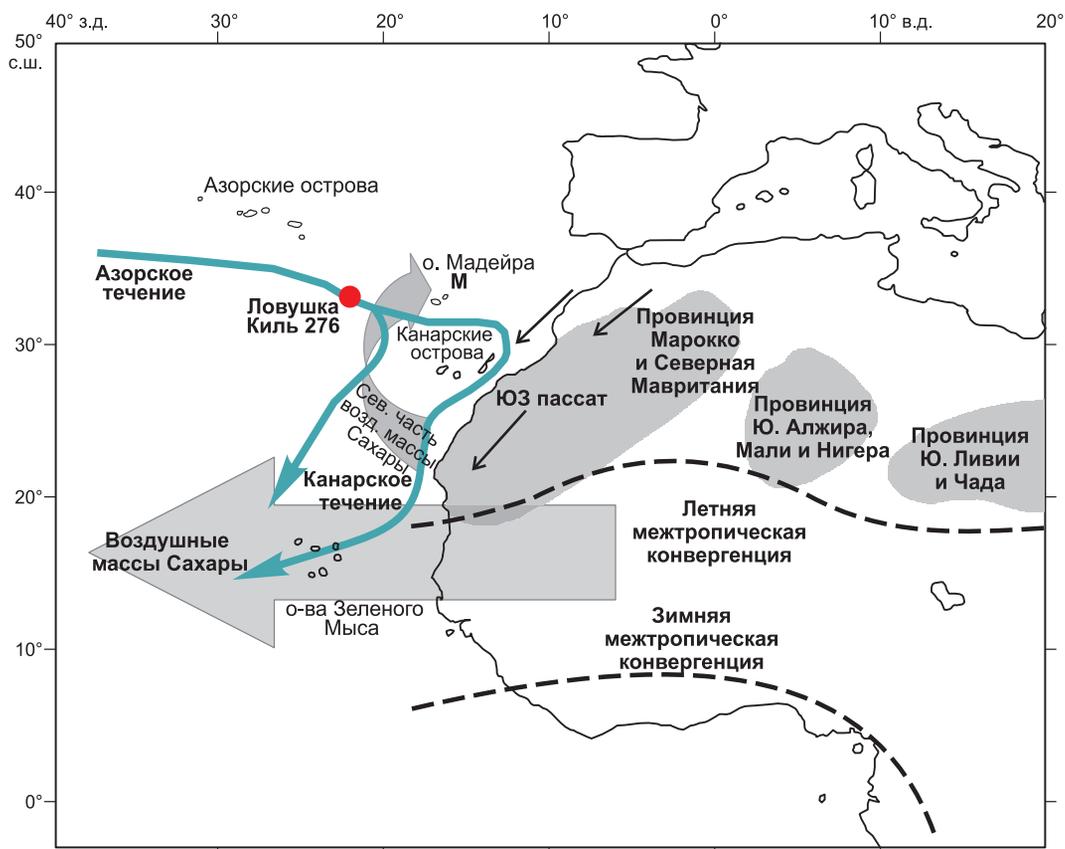


Рис. 17. Течения и главные перемещения воздушных масс в районе постановки ст. 276.

Ловушка седиментационная для изучения потока эолового материала через водную толщу на глубине 2 тыс. м [Brust, Waniek, 2010]. Северная семиаридная зона.

новить на глубине 2 тыс. м седиментационную ловушку на 4 года (рис. 17, ст. 276), которая зарегистрировала не только межгодовые и сезонные изменения вертикальных потоков рассеянного вещества, но и тонкие изменения минерального состава потоков: аэрозольного и местного (биогенного) [Brust, Waniek, 2010].

Донные осадки — это главный самописец природных процессов, работающий непрерывно (и в пространстве, и во времени) на протяжении десятков-сотен-тысяч и миллионов лет, в четырехмерной системе.

Разрешение записей во времени связано со скоростью осадконакопления. Наиболее высокоразрешающие записи — в местах с самыми высокими скоростями седиментации в морях и их отдельных регионах, т.е. в областях лавинной седиментации [Лисицын, 1974, 1978].

Еще выше разрешающая способность в отложениях природных ловушек в водосборе на суше, т.е. в континентальной части глобального планшета: в покровных ледниках Гренландии, Антарктиды, островов Арктики, которые сейчас пробурены и исследованы, т.е. в ледовых самописцах среды и вещества.

О высотном простирании горизонтальных потоков эолового вещества на разных высотах (до 6—8 тыс. м) также можно судить по кернам бурения горных ледников [Соломина, 1999, 2007; Оледенение..., 2006; Михайличенко, 2007].

Есть и другие высокоразрешающие самописцы эоловых процессов на суше. Это верховые болота аэрозольного питания (омбротрофные) и их растительность, а также донные отложения озер с их микрослоистостью, реки, растительность и почвы.

При сравнительном изучении рассеянного эолового вещества в пробах и разрезах из разных природных ловушек (океана и суши) впервые можно увидеть и понять глобальные, а не только местные (и региональные) закономерности эолового процесса, причем не только в современных условиях, но и в изменяющихся условиях среды прошлого — пока для кайнозоя и частично мезозоя (керны глубоководного бурения).

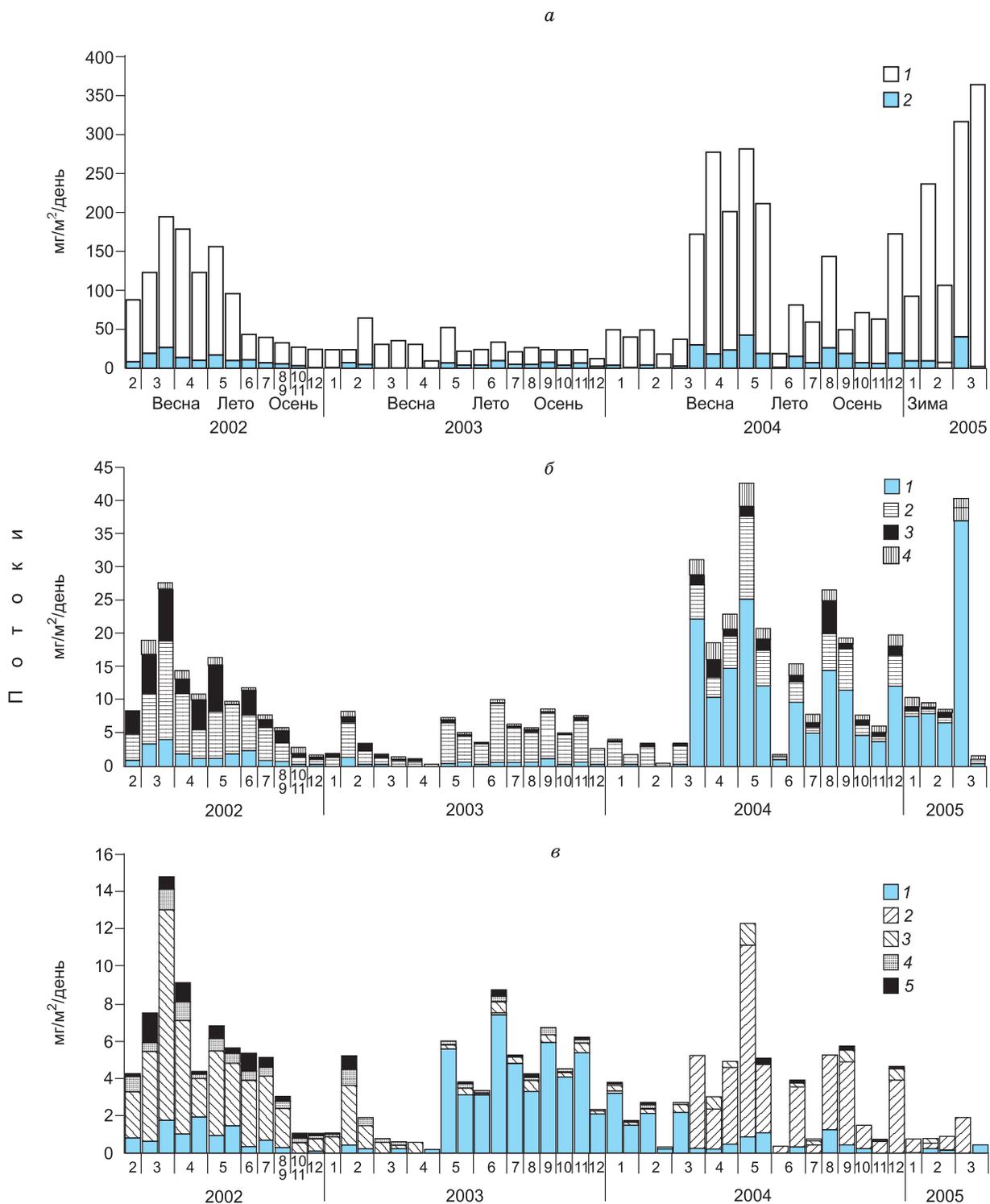


Рис. 18. Рассеянный осадочный материал (гидрозоль) в седиментационной ловушке на глубине 2 тыс. м (вертикальные потоки, литогенный материал, глинистые минералы — изменения за 4 года непрерывных исследований [Brust, Waniek, 2010].

a — вертикальные потоки рассеянного вещества в точке ст. 276: 1 — поток биогенного вещества, 2 — поток литогенного вещества; *б* — литогенный материал из ловушки (поток $\text{мг/м}^2/\text{день}$): 1 — кварц, 2 — глинистые минералы, 3 — полевые шпаты, 4 — прочие; *в* — потоки глинистых минералов: 1 — палыгорскит, 2 — смектит, 3 — иллит, 4 — каолинит, 5 — хлорит.

Межгодовые резкие изменения величины и вещественного состава потоков литогенного материала в 2004—2005 гг. сравнительно с 2002—2003 гг. — межгодовая изменчивость.

Другая замечательная особенность океанов — в них располагаются места с минимальными на Земле скоростями седиментации (менее 1 и 1—3 мм/тыс. лет) («полюсы недоступности» для осадочного вещества), для которых характерны уникальные процессы. В частности, здесь идет новообразование ряда минералов (цеолиты и др.) [Лисицына, Бутузова, 1976].

Упомяну еще одну особенность: возможность для одного отрезка времени сопоставить осадочные процессы разных форм осадочного вещества, проходящие во всех или нескольких внешних геосферах в ходе их природного взаимодействия и с записью этого взаимодействия в донных осадках.

Речь, таким образом, идет о выделении автором особой формы осадочного вещества — рассеянной (взвеси). Его частицы не находятся в контакте друг с другом, обычно тонкодисперсны, с развитой поверхностью, мобильны, активны. Они взаимодействуют со средой (в том числе через биоту), накапливают информацию о среде (РОВ как новый источник информации) и сохраняют эту информацию в донных осадках.

Удалось установить, что рассеянное осадочное вещество присутствует во всех геосферах (внешних), причем обычно в малых, невидимых количествах [Лисицын, 1978, 2001, 2004б], и что изучение именно этой формы осадочного вещества в средах открывает возможность прямого изучения современного осадочного процесса в океане как результата смешения потоков рассеянного осадочного вещества всех геосфер — внешних и внутренних (надводный и подводный вулканизм, и сопровождающие гидротермальные процессы). Эта информация открывает новые возможности восстановления условий среды прошлого.

Изучение рассеянного вещества, создание приборов и методов для его прямого или дистанционного исследования с геологическими целями было начато в России в лаборатории физико-геологических исследований Института океанологии РАН с первого рейса НИС «Визязь» в 1949 г. [Лисицын, 1955а,б, 1956; Лизунов, Лисицын, 1955] и продолжается до настоящего времени.

Ниже приведены наиболее надежные новые результаты изучения рассеянного осадочного вещества в атмосфере, полученные в ходе отечественных экспедиционных рейсов, а также по данным зарубежных исследователей.

ПРОЦЕССЫ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ И РАССЕЯННЫЕ АЭРОЗОЛИ АРИДНЫХ ЗОН МИРОВОГО ОКЕАНА

Накопленный к настоящему времени материал по рассеянному аэрозольному осадочному веществу в атмосфере, рассеянному веществу в водной толще (гидросфере), а также (в высоких широтах) в криосфере и в донных осадках позволяет конкретизировать общие положения в пределах всего Мирового океана.

Как отмечалось выше, существуют четыре главных центра подготовки (рассеяния, выдувания) аэрозольного вещества на суше, которыми определяются области захвата, переноса (транспортировки) и отложения в океане.

Аридная зона Северного полушария — аэрозоли, гидрозоли и донные осадки, сопоставление

Эту главную по значению часть аридного осадкообразования (область подготовки вещества в центрах на суше и отложения в океане) можно разделить на две части: 1) Сахара — центр подготовки аэрозолей и область аридных донных осадков Атлантики, Средиземного моря и северо-западной части Индийского океана; 2) пустыни Восточной Азии и лессовое плато Китая определяют ход аридной седиментации в северной части Тихого океана и морях его западной части. Это Восточно-Азиатский центр и область его развеивания.

Аридный центр Сахара — аэрозоли, гидрозоли и донные осадки. Ареалы, главные векторы и минералогические провинции. Синтезировать разрозненные сведения по перемещению эолового материала на запад и северо-запад от Сахары (западный аэрозольный коридор) удалось только после начала регулярных спутниковых наблюдений. На рис. 14 дана сводка спутниковых данных по переносу эолового материала через Атлантику по годам (с 1989 до 1992 г.) [Swap et al., 1996]. Видна значительная межгодовая изменчивость в положении областей максимальных горизонтальных потоков аэрозолей. Эта северная аридная часть Атлантического океана составляет по площади около 26 млн км² и протягивается по широте на 40°, т.е. это основная часть северной аридной зоны этого океана. Она служит своеобразным мегаполигоном для изучения морской аридной седиментации.

Западный и юго-западный потоки. На основании сопоставления спутниковых данных с метео и другими показателями, удалось определить эмиссию аэрозолей в Атлантику из Африканского центра для каждого года от минимальной в 1990 г. (130 млн т) до максимальных значений в 1991 г. (460). На

пересечения восток—запад через эту аридную часть океана содержания аэрозолей менялись от 70 мкг/м³ у берегов Африки до 47 мкг/м³ по наблюдениям на о. Барбадос и 10 мкг/м³ на п-ове Флорида (США).

В экстремальные годы в «море мрака» у берегов Африки содержания аэрозолей достигали 2000 мкг/м³, а на о. Барбадос до 500 мкг/м³ [Swar et al., 1996].

На рис. 14—16 показаны средние площади этого аэрозольного коридора — Западная Атлантика. Как и приведенные карты, этот рисунок показывает сильные межгодовые изменения площади коридора. Эти изменения еще раз показывают, что атмосферный перенос рассеянного вещества зависит от метеоусловий: он так же изменчив во времени, как и метеоусловия. Для более длительных отрезков времени важную роль играют изменения климата в этой части океана и климата в области эмиссии (в пустынях Сахары).

В соответствии с этим меняются не только дальность переноса и концентрация аэрозолей по годам, но также и площади распространения горизонтального потока аэрозоля по пути его движения на запад. В целом это дает возможность определить разгрузку аэрозольного материала при его следовании по западному коридору переноса (по годам и месяцам года).

Интересно сопоставить эти карты с определениями, сделанными почти через 15 лет на ст. К-276 (между о. Мадейра и Азорскими островами) [Brust, Waniek, 2010]. Эта постановка седиментационной ловушки дает возможность измерить (прямым образом) вертикальный поток этого аэрозольного вещества не в атмосфере, а в морской воде, на глубинах 3 тыс. м (рис. 17). Наблюдения велись непрерывно на протяжении трех лет. Здесь (рис. 18) тоже четко видна межгодовая изменчивость как количества, так и состава вертикального потока рассеянного осадочного вещества. В 2004—2005 гг. величина потока была максимальной (до 350 мг/м²/день, а в 2003 г. она на протяжении всего года (определения по месяцам) не превышала 50 мг/м²/день.

Главное значение все годы здесь, на границе с северной гумидной зоной, имел поток биогенного материала, определенный ловушкой на глубине 3 тыс. м. Терригенный материал (эоловый) составлял обычно 1/5—1/10 от общего, а в марте—апреле 2003 г. его почти не отмечалось, так же как и зимой этого года (январь—февраль).

Удивительно, если не совпадение, то близость потоков биогенного и терригенного вещества за все годы (больше терригенного, больше и биогенного). Это связано с тем, что эоловый материал содержит немного биогенных элементов, которые обычно лимитируют продукцию (и потоки остатков фитопланктона). Эта особенность эолового рассеянного вещества подтвердилась и при работах у берегов Венесуэлы (впадина Корнако), а также на суше при изучении лесов Амазонии.

Казалось бы, здесь возникает парадоксальная картина: вещество пустынь оказывается плодородным (но только в очень ограниченной мере!). Решающую роль биогены играют в своеобразных оазисах (апвеллингах), возникающих в морских пустынях. При достаточном количестве воды на суше также возникает оазис. В океане в условиях избытка соленой воды развитие жизни лимитируется биогенами, которые приносятся с аэрозолями, т.е. аридные области суши скудно питают биогенами фитопланктон океана (в тех же природных климатических зонах), иначе бы жизнь здесь прекратилась.

Важные данные на станции К-276 получены для изучения состава тонких фракций минерального вещества (и отдельно для глинистых минералов), и это только сейчас стало возможным, причем непрерывно (при наблюдениях с отбором проб, собранных ловушками-автоматами ежемесячно).

И здесь видны значительные межгодовые изменения минерального состава рассеянного вещества в толще вод. Если в 2002 г. преобладали глинистые минералы и полевые шпаты с небольшими количествами кварца, то в 2003 г. кварц исчезает почти полностью, но в марте 2004 г. кварц снова на весь год становится главным минералом. Таким образом, на протяжении этих лет сменялись минералогические комплексы аэрозолей и гидрозолой (рассеянного осадочного вещества), причем уже не в атмосфере и не на поверхности, а в морской воде на глубине 3000 м. Особенно резкие изменения наступили в 2004—2005 гг. Это совпадает с резким ростом содержания рассеянного вещества в целом и его терригенной (минеральной) части.

Не менее показательные изменения происходили в эти годы в группе глинистых минералов. В 2002 г. и до апреля 2003 г. доминирует иллит, а с 2003 г. палыгорскит (минерал-индикатор пустынь Сахары). С марта 2004 г. — новое резкое изменение — наступает господство смектита, причем на протяжении всего года, а также первых трех месяцев 2005 г. Гранулометрический состав рассеянного вещества за это время существенно не менялся, что доказано анализами.

Особо следует подчеркнуть, что потоки биогенного вещества ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + 2\text{C}_{\text{орг}}$) не связаны с потоками минерального, поскольку минеральная часть зависит от эолового переноса, а биогенная (кроме небольшого вклада эоловых биогенных элементов, особенно Р и N) зависит от других факторов. Сезонные изменения западного аэрозольного трансатлантического потока показаны на рис. 19.

Северный (средиземноморский) поток. Гранулометрические пояса. Не менее отчетливо выделяется северное (средиземноморское) направление потока аэрозолей из Сахары. Перенос пыли из

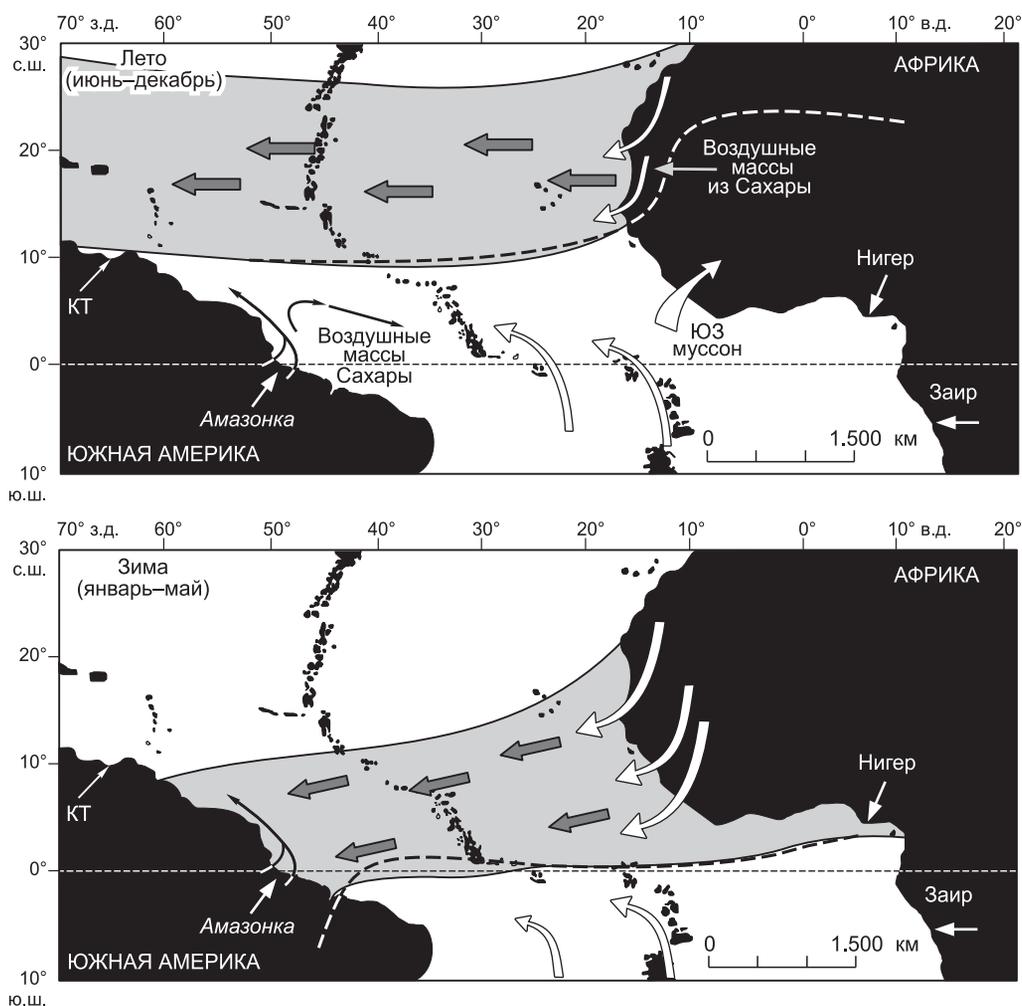


Рис. 19. Западный и юго-западный поток аэрозолей из Африки.

Изменение трасс трансатлантического переноса Сахара—Южная и Северная Америка в зависимости от сезона года летом (июнь—декабрь) и зимой (январь—май) [Zabel et al., 2003]. КТ — впадина Кариакто у берегов Венесуэлы, где удалось изучить историю трансатлантического переноса [Elmore et al., 2009].

Сахары в Европу был известен еще с античных времен (около 3 тыс. лет назад). Во времена Гомера, Вергилия и Ливия описаны «кровавые дожди», связанные с вымыванием пыли, а в Северной Европе — выпадение красного и желтого снега.

На современном уровне с применением спутников и многочисленных метеорологических станций на островах Средиземного моря и на суше, а также при изучении донных осадков Средиземного моря [Емельянов, 1982; Тримонис, 1995; Шимкус, 2005] удалось построить из этой мозаики данных общую картину процесса аэрозольного переноса не только к западу, но также и к северу от Африки.

При самом общем подходе могут быть выделены три области (P, T, D), сменяющиеся по мере удаления от пустынь Африки на север, т.е. на удалении до 5—7 тыс. км [Stuut et al., 2009] (рис. 20).

1. Область питания осадочным веществом (зона P) — это область пустынь, знаменитых «песчаных морей» Северной Африки, которых насчитывается около 30. Частота пылевых бурь со снижением видимости до < 1 км в Северной Африке 15—20 дней в год. Главную роль здесь играют грубые фракции — песчаные и крупноалевритовые, которые перемещаются перекачиванием или сальтацией, а при пылевых бурях из них выдувается более тонкий алевритовый материал, в том числе классические фракции лесса (10—50 мкм), а также фракции пелита (мельче 10 мкм). Это зона песков.

2. Зона периодического перемещения осадочного вещества пустынь с общим вектором движения на север сменяется водным пространством Средиземного моря — природной ловушкой песчаного, а в основном алевритового материала («морского лесса»), который в донных осадках смешивается с биогенным материалом и другими осадкообразующими компонентами. Исходный (т.е. не смешанный) аэрозольный материал удалось уловить на островах Средиземного моря (лессы Канарских островов, о. Крит в

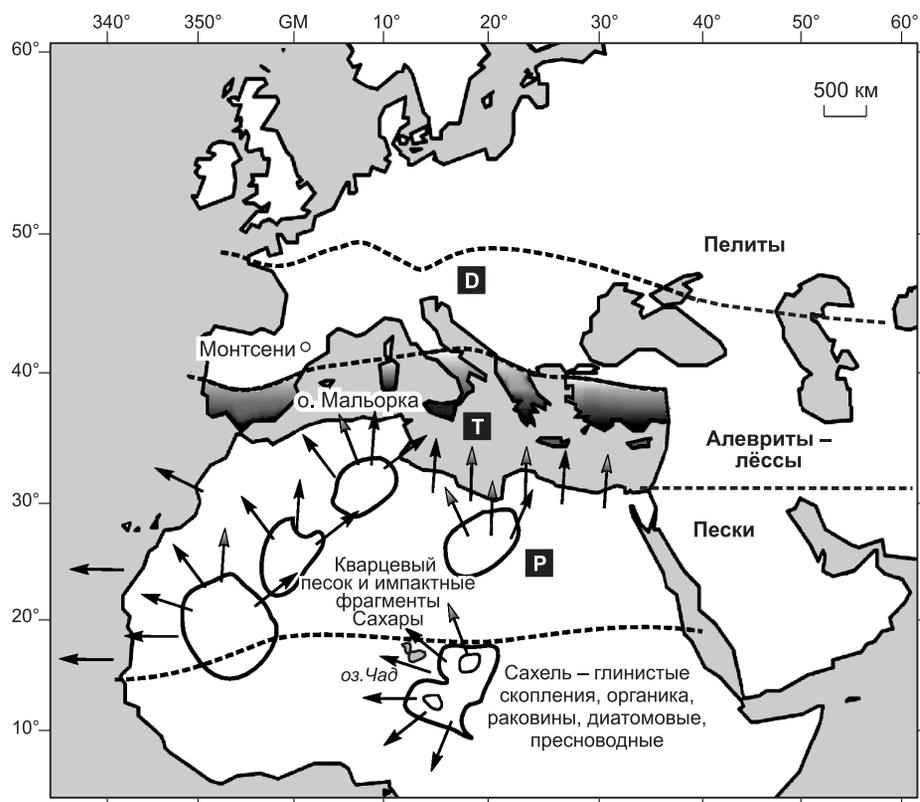


Рис. 20. Северный поток аэрозолей из Африки (Средиземное море, Европа, юг России).

Стрелки — направления переноса. Три последовательные зоны (P, T, D) с изменением гранулометрии (от песков через алевриты до глины) и состава по мере удаления от источника [Stuut et al., 2009].

Италии и на Альпах). При раскопках древних городов Греции («золото Шлимана») толщина лессовых отложений достигала 10 м и более. Эта область транспортировки шириной 1—2 тыс. км (в направлении переноса) называется зоной Т (transportation). Именно здесь осаждается главная часть алевритовой фракции и прекращается многократное переувлажнение материала пылевыми бурями. Это зона алевритов.

3. Еще далее на север располагается зона D (deposition), где идет осаждение, т.е. накопление в почвах и донных осадках озер и морей (Черное, Каспийское, Аральское) (а к западу это соответствующая часть Восточной Атлантики). Именно здесь идет основное накопление самых тонких (пелитовых) фракций пустынь Африки. В основном это частицы 2—4 мкм, иногда с примесью небольшого количества алеврита. Значительную роль, как и на дне морей, играет рельеф суши: на вершинах и склонах поднятий повышается содержание самых грубых фракций.

Внешние границы зоны D простираются до Англии, Скандинавии и Центральной России — это аллохтонная часть почв и донных осадков водоемов этой зоны. Это зона пелита.

Обратимся теперь к количественной стороне процесса. Общая эмиссия рассеянного аэрозольного вещества из пустынь Африки достигает, по последним наиболее точным данным, 460 млн т/год (см. табл. 1). Из этого количества на север по воздуху идет 80—120 млн т, а на северо-запад (в Атлантический океан) — 340—380 млн т [Stuut et al., 2009].

На примере развеивания отложений крупнейшей на планете пустыни Сахара можно видеть глобальные масштабы процесса, а также масштабы его воздействия на сушу и океан — рассеивание осадочного вещества (более чем на 5 тыс. км от источника) и его дифференциацию.

Примечательно и то, что главная часть этого материала сгружается в пелагические части Атлантического океана и Средиземного моря, причем именно в его северную аридную зону. Все сказанное подтверждает дискутируемое многими положение о том, что природные зоны суши не продолжают в океаны и не образуют глобальных общих природных зон (климатических или широтных). Эти примеры напрямую показывают продолжение аридных зон суши в аридные зоны океана и по количеству аэрозолей, и по их составу, и свойствам вещества.

Для аэрозольного осадочного материала вообще характерна очень сильная изменчивость как по количеству вещества, так и по его составу и свойствам (рис. 21, 22). Это связано с изменчивостью как в

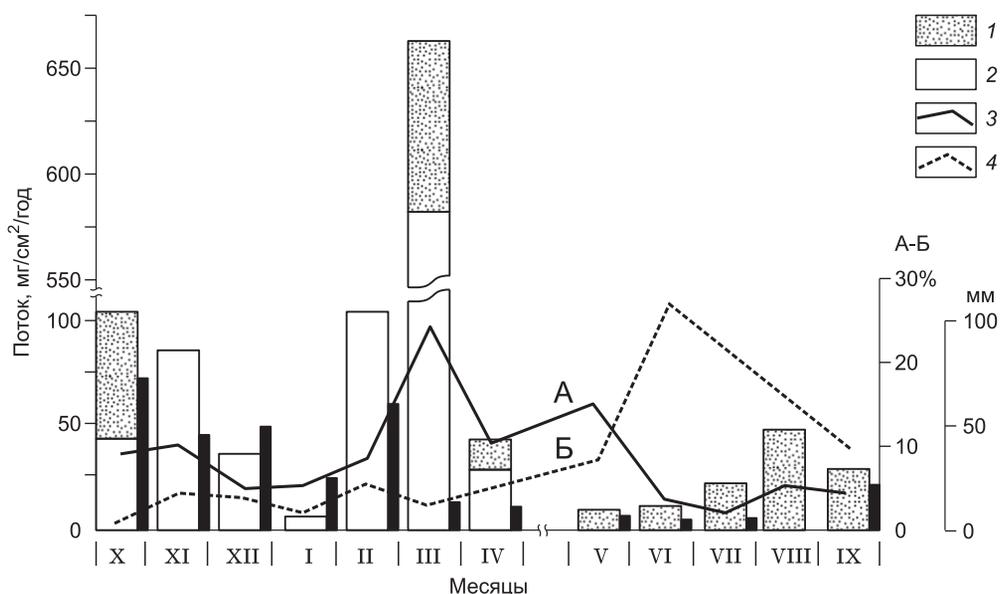


Рис. 21. Северный поток аэрозолей Африки.

Средние месячные потоки сухого и растворенного вещества воздушной взвеси из Африки по наблюдениям на о. Сардиния в 1990—1991 гг. в сравнении с выпадениями аэрозолей в Европе (А) и с поступлением пыли из Африки (Б) [Guerzoni et al., 1997]. Годовой поток аэрозолей здесь 1300 мг/см²/год, из них из Сахары поступает 1100 мг/см²/год. 1 — сухие выпадения аэрозолей, 2 — влажные (вымывание), 3 — потоки аэрозолей в Европе, 4 — поступление аэрозолей из Сахары.

подготовке и поставке осадочного вещества по воздуху, так и с изменчивостью его осаждения через толщу атмосферы (условия погоды, особенно вымывание атмосферными осадками). Особенно четки эти изменения на поверхности моря, а далее через водную толщу до дна они выявляются при непрерывных длительных наблюдениях в одной точке, когда одновременно со сбором аэрозолей определяют силу и направление ветра, влажность, атмосферные осадки и др., а также содержание, состав и потоки водной взвеси (куда входит и аэрозольный материал после его осаждения на поверхность моря). Поэтому приводят, как правило, наиболее обычные для данного места интервалы содержания аэрозолей в приводном слое, основанные на значительном количестве измерений.

Например, на о-вах Сардиния, Корсика, Крит — 20—25 г/м²/год (среднее 10 г/м²/год). В западной части Средиземного моря: 6—46 (среднее 20 г/м²/год), а на горе Монблан (по кернам бурения ледников) — 1 г/м²/год. Для последних 30 лет в кернах бурения льда Альп 0.4 г/м²/год. Среднее глобальное, по данным Rea [1994], 0.20—0.25 мг/см²/год, причем с удалением от источника уменьшение достигает 4—5 раз [Guerzoni et al., 1997].

Есть еще один важный показатель поставки аэрозолей: количество пылевых бурь в аридных центрах суши за год (см. выше). Если в Северной Африке их 10—25 в год, то в Иране — до 80.7 дней в год — это полюс выдувания и поставки осадочного вещества аэрозолями с суши [Pue, 1987]. Наконец,

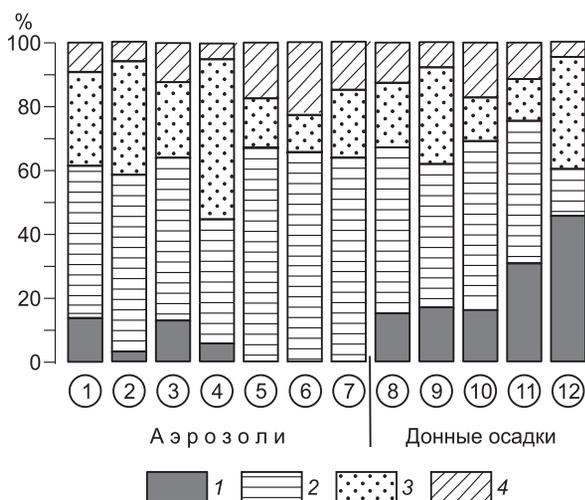


Рис. 22. Сопоставление глинистых минералов аэрозольного вещества над Средиземным морем (пр. 1—3) с глинистыми минералами донных осадков Средиземного моря (пр. 8—12) [Guerzoni et al., 1977].

Пробы: 1 — о. Сардиния, 2 — Тирренское море; 3—6 — разные участки Тирренского моря, 7 — местный аэрозоль о. Сардиния (не связанный с Сахарой); донные осадки: 8 — северная часть Тирренского моря, 9 — южная часть Тирренского моря; 10 — северная часть Адриатического моря, 11 — южная часть Адриатики; 12 — средний состав глинистых минералов для 30 проб донных осадков Средиземного моря. 1 — смектит, 2 — иллит, 3 — каолинит, 4 — хлорит.

Рис. 23. Минеральный состав аэрозолей Африки и Аравии [Серова, 1988]. Восточный поток аэрозолей, минералы-маркеры.

a — распределение пальгорскита (%): 1 — менее 10, 2 — 10—20, 3 — 20—30, 4 — более 30; *б* — распределение доломита (%): 1 — 0—10, 2 — 1—5, 3 — 5—10, 4 — более 10.

важные доказательства дает и прямое изучение минералогии аэрозолей (рис. 23, 24).

Восточно-Азиатский центр развеивания и транстихоокеанский поток аэрозолей. Питающая провинция Африки (провинция развеивания) на восток продолжается пустынями Аравии, Средней Азии (Каракум, Кызылкум и Муонкум), а еще восточнее — Кашгарии и Джунгарии (Такла-Макан, Цайдам), а также пустынями Гоби (Алашань, Ордос и др.).

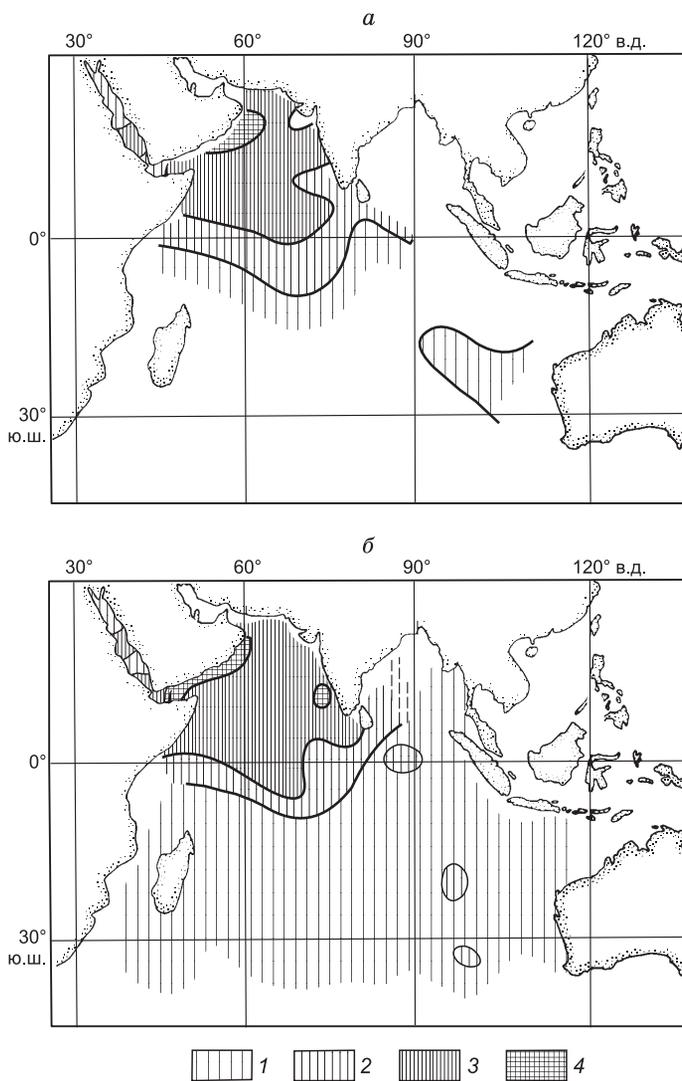
Общее направление переноса аэрозолей здесь с запада на восток, т.е. в сторону Тихого океана. Еще в древние века китайские и японские ученые отмечали явление «коса» (желтый песок), связанное с выпадением желтого аэрозоля алевритовой размерности, чаще всего весной (в марте—мае). Такие «весенние паводки аэрозолей» (сходного состава) наблюдались также в Корее и Китае, на Курильских островах, а также на островах северной аридной зоны Тихого океана. Имеются многолетние данные для Гавайских островов (о. Оаху), о-ва Мидуэй, Алеутских и других островов, как к северу от экватора, так и для Тихоокеанского побережья США (рис. 25, 26).

Замечательной особенностью Тихого океана является то, что он окружен со стороны континентов и островных дуг рвом глубиной до 10—11 км. Это природная преграда для речного и абразионного осадочного вещества, поступающего со стороны суши, и поэтому главная часть минеральной составляющей донных осадков, которая может преодолеть это препятствие, — эоловая. Только в крайних северных и южных частях океана к ним добавляется ледовый рассеянный осадочный материал. Эта тектоническая особенность (активные окраины) Тихого океана во многом предопределяет условия седиментации, отличает его от всех других океанов.

Важная (часто преобладающая) часть осадочного вещества в Тихом океане — биогенная ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + 2\text{C}_{\text{орг}}$), а близ срединных хребтов — осадочно-вулканогенная (гидротермы и подводные вулканы со специфическими осадками).

Еще одна замечательная особенность этого океана в том, что поставка главной части аэрозольного вещества из лессовой области Китая идет здесь обычно не напрямую (из пустынь), а через обширную область, поднятую более чем на 1 тыс. м, лессового плато Китая. Здесь находится уникальный разрез лессовых отложений суши, его возраст достигает 8 млн лет [Sun, Zhu, 2010]. Здесь чередуются прослой лессов и палеопочв, а в нижней части разреза они переходят в красные глины [Liu, 1985; Sun, 2000, 2002].

В настоящее время этот разрез континентальных эоловых отложений детально изучен современными методами. Он сопоставлен с полными разрезами льдов Гренландии и Антарктиды, а также с опорными разрезами глубоководного бурения и длинными колонками донных осадков. Среди них колонка У21-146 длиной 12 м, которая получена в западно-аридной части Тихого океана (по океанскую сторону от ограждающих глубоководных впадин) [Novan, Rea, Pisiyas, 1991] (рис. 27). По определениям авторов, она характеризует особенности осадочного процесса в океане (поступление аэрозольного и биогенного материала) на протяжении последних 530 тыс. лет.



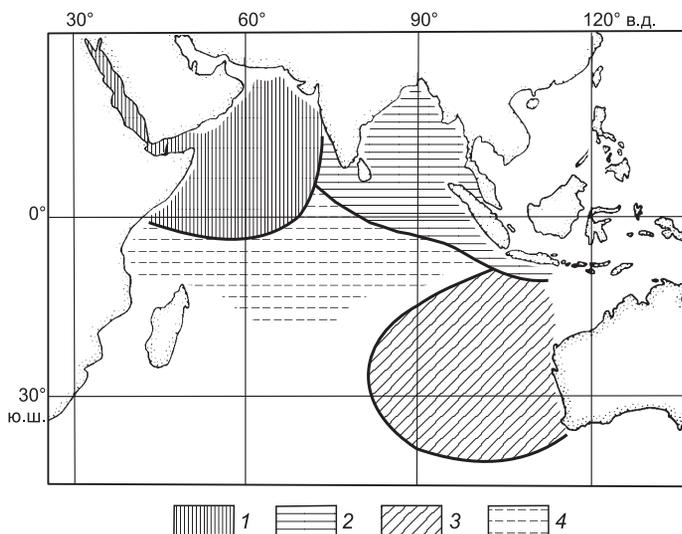


Рис. 24. Минералогические провинции аэрозолей Индийского океана [Серова, 1988].

1 — Африкано-Аравийская, 2 — Индийско-Индонезийская, 3 — Австралийская, 4 — центральной части океана.

Значение потоков биогенного вещества менялись в разрезе этой колонки (а также в нескольких других, расположенных в аридной зоне) от 58 до 1435 мг/см²/1000 лет, а потоки рассеянного аэрозольного от 43 до 718 мг/м²/1000 лет (во время оледенений они повышались в 4 раза сравнительно с межледниковьями). Повышение запыленности атмосферы при оледенениях в 3—4 раза отмечено и в кернах бурения льдов Гренландии и

Антарктиды, горных ледников, а также по вкладу олового материала в осадки Атлантики.

Изменения во времени отвечают шкале Миланковича, т.е. связаны с астрономической шкалой времени.

Не останавливаясь на деталях, подчеркнем, что корреляция наземных и океанских осадков (не только по возрасту и скоростям седиментации, но и по составу и свойствам, а также по времени), убеждает в очередной раз в том, что аридная седиментация суши протягивается далее через Тихий океан в виде аридной зоны океана с ее специфическими осадками и условиями их осаждения. По времени проявления они синхронны и сходны по составу вещества и свойствам. Это дает возможность определить также контуры огромного глобального облака аэрозольного вещества над океанами в геологическом прошлом (последние сотни тысяч — миллионы лет), реконструировать климат, направление и скорость ветра, участки развеивания и др.

Транстихоокеанский перенос аэрозолей, их отдельных компонентов (минералов, элементов — серы, углерода, азота), а также антропогенного вещества (загрязнений) был изучен многими авторами. Выпадение этого вещества дальнего переноса отмечалось в Калифорнии и западной части Канады, а в некоторых случаях достигало шт. Миннесота. Более того, прослой аэрозольного материала «азиатского состава» были обнаружены в кернах бурения Гренландии, а также в почвенных разрезах Гавайских островов (см. рис. 26).

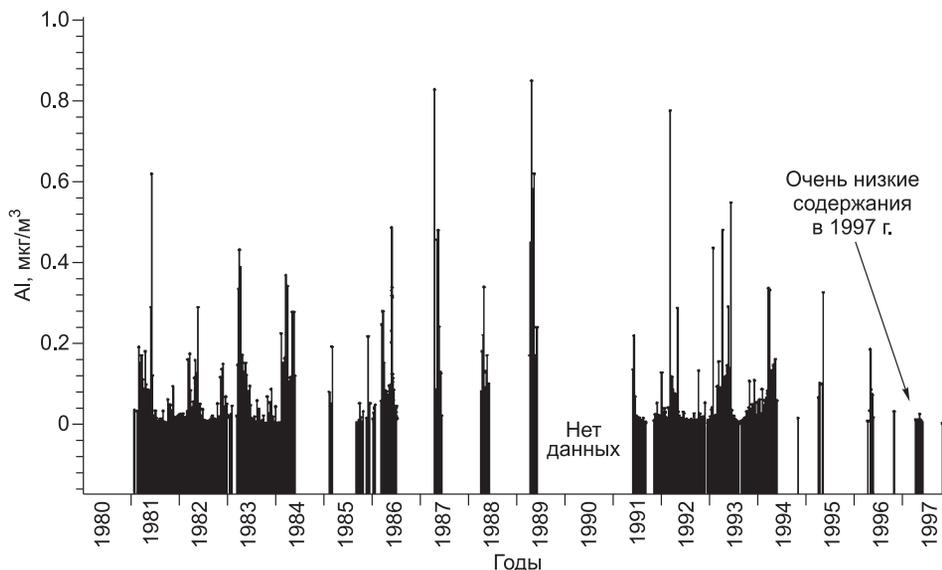
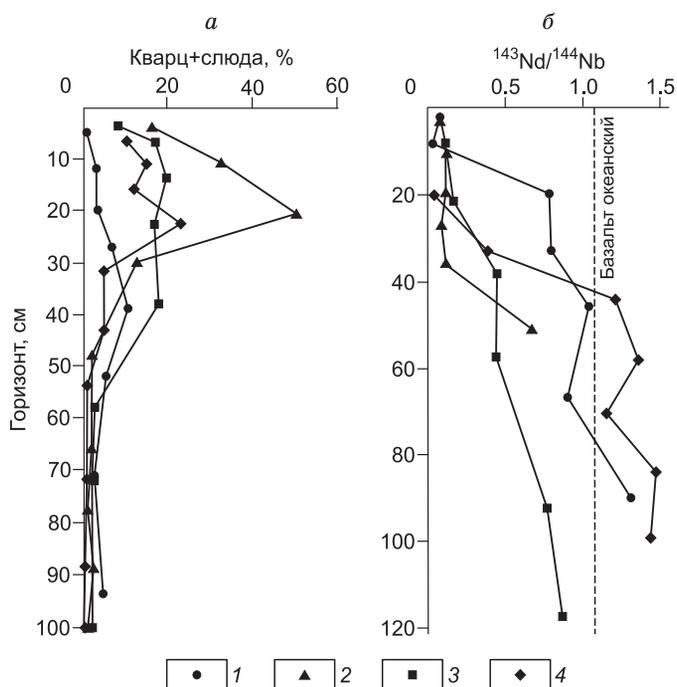


Рис. 25. Многолетние исследования (17 лет) содержания аэрозолей в атмосфере над о-вами Мидуэй (Тихий океан), перенос пыли пустыни Гоби через Тихий океан, северная аридная зона 28° с.ш.

Видны значительные сезонные и межгодовые изменения [Arimoto, 2001].

Рис. 26. Поступление «запретных» для океанской коры минералов с аэрозолями в разрезе почв Гавайских островов.

а — содержание кварца и калиевой слюды в почвенных разрезах четырех островов Гавайского архипелага; *б* — изменение изотопного отношения неодима в разрезе почв островов Гавайского архипелага в сопоставлении с типичным океанским базальтом [Arimoto, 2001].



Данные судовых наблюдений с помощью «парусов» и счетчиков частиц были получены в Тихом океане и в ряде экспедиций Института океанологии РАН, но они не всегда совпадали по времени с максимумами переноса.

В 1998 г. было начато международное исследование транстихоокеанского переноса, в котором приняло участие более 40 ученых разных стран [Huzar et al., 2001]. Это, видимо, было самое крупное исследование аэрозольного переноса над океанами за всю историю науки. Исследования включали разнообразные методы непрерывного дистанционного изучения с инситным отбором проб из облаков рассеянного эолового вещества с помощью самолетов, со сборами аэрозолей в приводном слое с судов, а также анализ взвеси из водной толщи, изучение донных осадков.

Основной упор был сделан на спутниковые наблюдения, причем использовались одновременно несколько систем спутников: геостационарные (три спутника), специальный спутник ТОМС для изучения озона, спутник SeaWifs для изучения цвета аэрозольных облаков. Применена также система непрерывного определения оптической толщины атмосферы (АЭРОНЕТ), лидары. Инситные наблюдения использованы для определения содержания частиц, их гранулометрического, химического и других видов анализа. Сбор проб велся как на наземных станциях, так и с самолетов, т.е. непосредственно из облака аэрозольной взвеси. Отмечался также цвет неба: при безоблачной погоде голубой (малые содержания «коса»-материала), белый и желтоватый (или серый) при высоких содержаниях.

На суше от Японии и Кореи до США и Канады проводились одновременные сборы с использованием более чем 200 импакторных счетчиков PM10 (улавливание частиц мельче 10 мкм) и несколько PM-2.5 (мельче 2.5 мкм).

В апреле 1998 г. вся область развеивания Гоби обеспечивалась постоянными метеорологическими наблюдениями. Эти исследования охватили два пика трансокеанского переноса аэрозоля: 15 и 19 апреля. Особенно сильной была пылевая буря 19 апреля, когда содержание аэрозоля достигало на побережье США 150 мкг/м³. Облако достигло берегов США через 5 сут, преодолев расстояние 8 тыс. км от берегов Японии до Северной Америки. Это был самый сильный выброс аэрозолей из Азии за весь 1998 г. (в 2—4 раза сильнее, чем обычные). Диаметр частиц аэрозоля 29 апреля, т.е. в конце переноса через Тихий океан, был 2—3 мкм, а концентрация находилась в пределах 20—50 мкг/м³ с пиковыми значениями до 100—150 мкг/м³.

На рис. 28 показано движение облака взвеси на всем пути от Гоби до берегов США. Видно, как проходит и меняется по очертаниям каждые сутки это облако по главной трассе Азия — Северная Америка и как происходит рассеяние взвеси не только во всей западной части Тихого, но также и в восточной части Индийского океанов (по значениям оптической толщины атмосферы более 0.3 и 0.2).

Средняя скорость движения на восток этого аэрозольного плюма составляет 12 м/с. По мере продвижения на восток значительная часть частиц осаждаются, а также уходит в ореолы рассеяния, которые кроме упомянутых частей океана достигают также Арктики (тихоокеанский поток аэрозолей в Арктике). Высота плюма при его прохождении через океан выше слоя облаков (иначе дальнейшее распространение прекращается вымыванием дождями).

В западной части Тихого океана от о. Тайвань до Новой Гвинеи было проведено несколько рейсов американо-китайской экспедиции по изучению аэрозолей (сухие и мокрые выпадения) [Zhou et al., 1992]. Все элементы были разделены на три группы по генезису: 1 — связанные с морской солью; 2 — связанные с поступлением из естественных источников на континентах; 3 — антропогенные. Содержания элементов, поступающих с поверхности моря, оказались в пределах 10⁻⁵—10⁻⁶ г/м³. Как и в других исследованиях, индикатором поступления аэрозолей с континента избран алюминий. Было установлено,

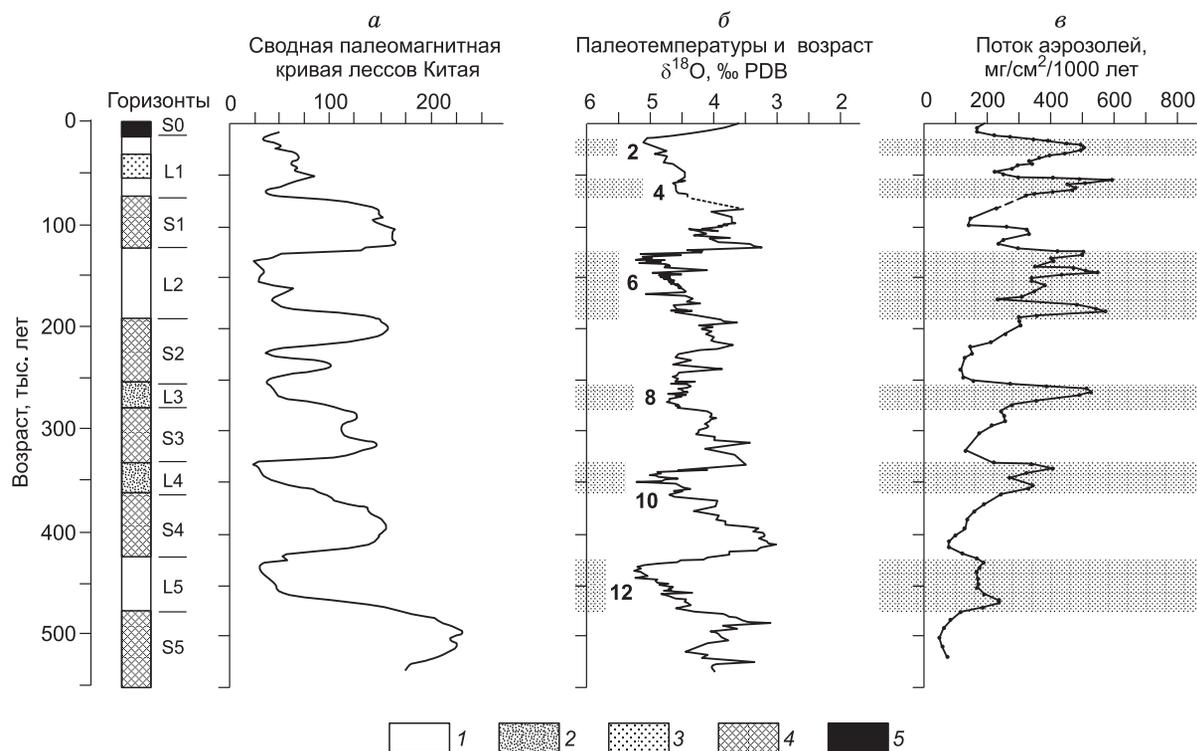


Рис. 27. История аэрозольного потока в аридной зоне северной части Тихого океана за последние 600 тыс. лет [Hovan, Rea, 1991].

a — история источника аэрозолей на суше — лессовое плато Китая. Разрез: 1 — лессы, 2 — выветрелые лессы, 3 — промежуточный слой, 4 — палеопочвы, 5 — верхний черный слой. Для сопоставления дана сводная палеомагнитная кривая лессового плато (в единицах магнитной восприимчивости). *б* — запись истории в колонке донных осадков скв. V21-146 и палеотемпературная кривая по кислороду.

Справа — изменения величины потока, цифры — события по палеотемпературной шкале (даны затемнениями) аэрозольного материала в районе станции. Горизонты накопления лессов (L1-5) соответствуют максимальным значениям потоков аэрозолей в колонке (*в*), величина потоков возрастает во время оледенений в 4 раза в сравнении с межледниковьем. Абсолютные массы донных карбонатных осадков здесь от 58 до 1435 мг/см²/1000 лет, а величина аэрозольного потока 43—718 мг/см²/1000 лет, т.е. аэрозоли составляют около половины осадочного вещества. Аэрозоль выделяется по гранулометрии (2.9—13.6 мкм).

что его содержание быстро понижается по мере удаления от континента. На максимальном удалении от суши оно снижается по крайней мере на порядок и составляет около 10⁻⁸ г/м³. Сходно распределение других элементов этой группы (Fe, Co и Sc). Их содержание возрастает по мере приближения к Филиппинам. Для всех этих элементов изменения величины фактора обогащения незначительны.

На островах Курильской гряды удалось собрать эоловый материал пылевых бурь и в почвах, и в осадочных отложениях островов. Здесь изучены как современные, почти не покрытые растительностью отложения тонкого эолового материала, так и песчаные дюны [Разжигаева, Ганзей, 2006].

Такие тонкозернистые отложения дальнего переноса обнаружены авторами на многих островах северной аридной зоны Тихого океана. В пыли, собранной в районе Владивостока во время «коса» в 2002 г., преобладал пелитовый материал (99 %), на долю мелкого алеврита приходилось только 0.25 %. Модальные значения в пределах 4—7 мкм, а средний диаметр 5.3 мкм. Характерна очень высокая степень сортировки, а для минерального состава появление в легкой фракции большого количества кварца (пелитовой размерности) и других чуждых коренным породам тихоокеанских островов минералов (К-слюд, амфиболов, эпидота). Во многих пробах кварц составлял до 80 %. Для пелитовой фракции характерна доминанта иллита (до 48 %) с небольшим количеством смектита (до 18 %) [Разжигаева, Ганзей, 2006]. Сходный гранулометрический и минеральный состав обнаружен также в палеопочвах аридных зон других островов Тихого океана. В разрезах они чередуются с пепловыми прослоями, карбонатным местным материалом и отложениями базальтовых кор выветривания.

АРИДНАЯ ЗОНА ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

В Южном полушарии материка — источники рассеянного аэрозольного вещества — занимают почти в два раза меньшую площадь, чем в Северном (19 и 39 % соответственно). Примечательно, что

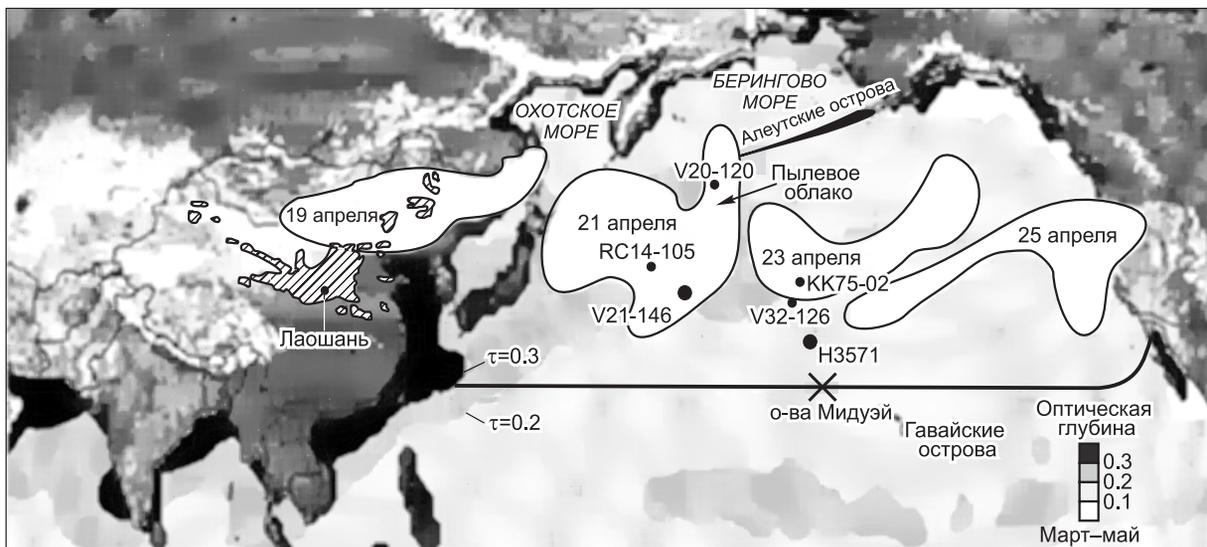


Рис. 28. Трасса трансокеанского потока аэрозоля «коса» от лессового плато Китая до берегов США и Канады.

Показано движение пылевого облака за 6 сут (с 19 по 26 апреля 1998 г.). Расстояние переноса около 5 тыс. км [Huzar et al., 2001]. Положение облака отслеживалось с нескольких спутников по оптической глубине (шкала справа), а также по донным осадкам (цифры — станции). По колонкам V21-146, H3571 и другим удалось проследить историю этого переноса за последние 500 тыс. лет, а также сопоставить с современными потоками, определенными при непрерывных наблюдениях для нескольких лет на о-вах Мидуэй и Гавайских островах (см. рис. 17, 18). Прямая линия внизу — разрез экспедиции на судне «Томас Томсон» (США) в марте 1985 г. с определениями РЗЭ в поверхностных водах. Установлено, что содержание РЗЭ в значительной части определяется аэрозолями [Greaves et al., 1999]. Крест — точка, равноудаленная от влияния континентов Азии и Северной Америки. В этой части океана проведены также многочисленные экспедиции России с отбором аэрозолей и донных осадков.

главная по площади часть суши и здесь расположена в аридной зоне (Австралия, Южная Америка). В ледовой зоне здесь располагаются крупнейшие по площади и древнейшие по возрасту ледовые самописцы Земли — ледовые покровы Антарктиды мощностью до 4 км. В кернах бурения льдов Антарктиды находят эоловый материал регионального распространения (Австралия и Пампа в Южной Америке), а также аэрозольный материал глобальный (аэрозоли, пеплы вулканов, материал ядерных взрывов, ДДТ, промышленные загрязнения и др.). Как и в Северном полушарии, другие глобальные самописцы здесь — это толща воды (с рассеянным осадочным веществом, в том числе аэрозольным) и толща донных осадков. Встречаются также и редкие острова с аэрозолями в атмосфере и в почвах, ледники, болота, озера и другие точечные придонные ловушки аэрозолей. Крупнейший источник аэрозолей в этом полушарии — Австралия.

Австралийский центр, потоки аэрозолей. Экстрааридные, аридные и субаридные территории в Австралии занимают 6.4 млн км², а в Южной Америке 3.01 млн км² [Петров, 1973] (рис. 29, 30).

Области питания терригенным эоловым материалом из пустынь суши здесь намного меньше, чем в Северном полушарии. Поэтому сплошного пояса эоловых осадков здесь не прослеживается, он разбивается на региональные участки, из которых наибольшие, прилегающие к Австралии, а также к пустыням и палеопустыням Южной Америки (Патагония). Наконец, особый вид области питания — обширные прибрежные пустыни Перу и Чили, они (в отличие от других) протягиваются не широтно, а меридионально, в соответствии с горными хребтами, т.е. тектонически обусловлены. Экстрааридные пустыни встречены лишь у основания горных хребтов. Здесь в некоторые годы вообще не выпадают атмосферные осадки.

Площадь питающих провинций рассеянного аэрозольного материала составляет в Южном полушарии около 10 млн км², т.е. около 1/3 общей площади пустынь материков.

О составе аэрозольного материала можно судить по пробам, полученным во время работ Советской Антарктической экспедиции на д/э «Обь» в 1955—1960 гг. [Лисицын, 1964; Серова, 1988]. Удалось изучить не только рассеянный осадочный материал атмосферы, но также водной взвеси (фильтрационные и сепарационные пробы) и колонок донных осадков [Лисицын, 1974].

Западно-Австралийская провинция аэрозолей отличается очень высокими значениями тонкозернистого кварца (до 40 %), сходного с кварцем австралийских пустынь. Здесь также самые высокие для

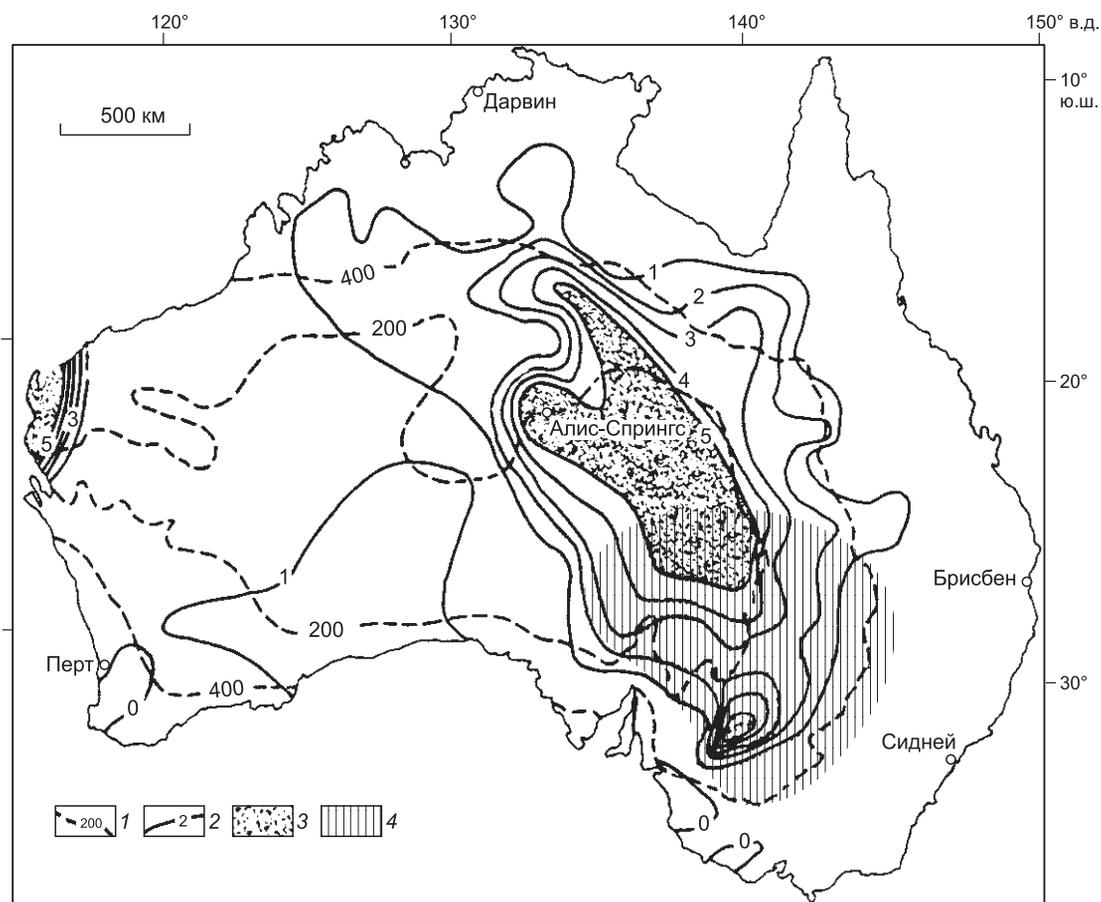


Рис. 29. Южная зона аридной седиментации. Среднее количество пылевых штормов в Австралии в год по наблюдениям 1957—1982 гг. с видимостью меньше 1 км [Pye, 1987].

1 — изолинии атмосферных осадков (мм/год); 2 — частота пылевых штормов (дней в год); 3 — область с повышенной частотой штормов (более 5 раз в год) и максимальной поставки аэрозолей; 4 — область с максимальной частотой штормов — центр максимального поступления аэрозольного материала из Австралии. Изолиниями показано среднее число дней с пылевыми штормами (видимость меньше 1 км). Изолинии проведены через 5 сут.

этого океана содержания полевых шпатов (до 20 %), а из глинистых минералов — колинита (до 40 % глинистых минералов).

В северо-западной части Индийского океана прослеживается влияние пустынь Аравии и Африки, о которых говорилось выше, с высоким содержанием палыгорскита, карбонатов (до 40 %) и доломита (см. рис. 23).

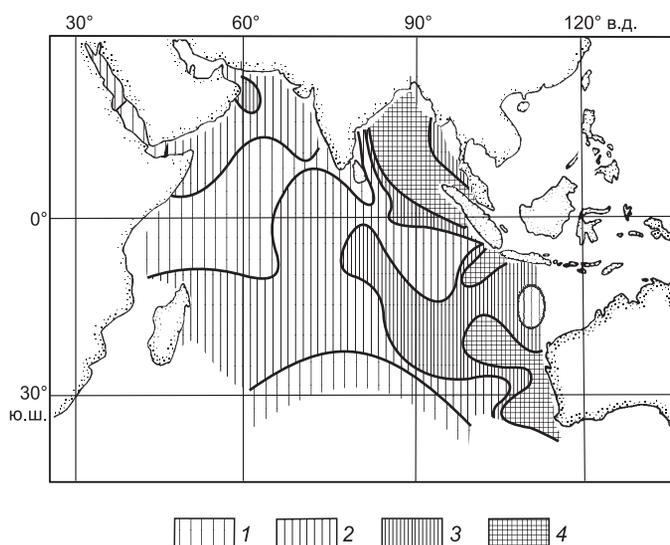
Величину древних потоков аэрозолей из Австралии в Антарктиду удалось изучить на основе анализа изотопного и минерального состава ледового ядра бурения на скв. Дом С в Антарктиде.

Во время последнего оледенения, как показывает сопоставление данных по разрезам болот Австралии, изучение колонок донных осадков и кернов глубоководного бурения, климат Австралии отличался исключительной сухостью, многочисленные озера пересыхали и превращались в пустыни. Тонкие фракции отложений при этом переносились в океан и достигали Антарктиды, где они отмечены в ядрах бурения льдов.

Большой интерес вызывает изучение колонки длиной 14 м к западу от Австралии, которая получена в области красной глубоководной глины (близ полюса минимальных скоростей седиментации). Нижние ее части имеют возраст 17.5 млн лет [Stancin et al., 2008]. Абсолютный возраст изучен по остаткам зубов акул в красной глине. Минеральный состав золотой фракции оказался по всей колонке близким к современному (с преобладанием кварца и иллита). Также почти неизменным оказался гранулометрический и изотопный (Pb, Sr, Ni) составы. Скорость седиментации в этой колонке также была близкой к ми-

Рис. 30. Распределение кварца (%) в аэрозоле к западу от Австралии и в северной части Индийского океана [Серова, 1988].

1 — менее 20, 2 — 20—30, 3 — 30—40, 4 — более 40.



нимальной из известных — 0.5 мм/1000 лет. Эти данные подтверждены данными других колонок красных глин из того же региона.

Таким образом, золотой материал, распространенный здесь и не разбавленный биогенным карбонатным материалом (глубины здесь больше критических), господствовал на протяжении более 17 млн лет.

По определениям последних лет величина вертикального потока осадочного вещества составляет здесь около 4 мг/см²/1000 лет, что типично для областей распространения красных глубоководных глин.

Южно-Американский центр, потоки аэрозолей. Важные данные по аэрозолям Южного полушария недавно получены при исследованиях самой близкой к Антарктиде части Южной Америки (область Пампа) [Kaiser, Lamu, 2010]. Здесь на удалении всего 38 км от берегов была пробурена скважина 1233 глубоководного бурения. Уникальное положение этой скважины (на материковом склоне (глубина 838 м) позволило сопоставить изменения уровня океана в недавнем прошлом с поставкой золотого вещества на ледник Антарктиды (рис. 31). При исследованиях широко применялись биомаркеры, проводился анализ микрофауны и др., что позволило сопоставить в деталях изменения уровня океана и потока аэрозолей. Связь между этими факторами обратная: падает уровень, обнажаются все большие площади покрытого рыхлыми легко развиваемыми донными осадками шельфа — растет содержание аэрозоля (все это точно записано во времени в природной ловушке, расположенной рядом — в леднике Антарктиды). В будущем этот фактор расширения развиваемой площади шельфа обязательно должен учитываться при реконструкциях палеосреды.

Исследованиям кернов бурения ледников Северного и Южного полушарий в сопоставлении с данными по современному аэрозолю за последние десятилетия посвящено множество статей. Из них следует, по крайней мере, три важнейших вывода.

1. Аэрозольный материал имеет глобальное распространение, причем не только сейчас, но и в геологическом прошлом, хотя его количество и состав меняются во времени. Важное значение имеет синхронность глобальных изменений уровня океана и содержания терригенного (моренного) материала в ледниках и на обнажающихся шельфах. В ледовые зоны поступает рыхлый осадочный материал морен и шельфов (при регрессиях, т.е. при похолоданиях). Эти зоны не получали речного вещества, который доминирует в других местах. Это своеобразные природные лаборатории-музеи естественной истории аэрозольного материала (и вулканических пеплов).

2. Сопоставление основных событий в Северном и Южном полушариях (с использованием кернов глубоководного и ледового бурения, и палеоаэрозолей) показывает, что главные события (оледенения и межледниковья, похолодание-потепление) — это события также в истории древних аэрозолей, т.е. атмосферы. Они синхронны в обоих полушариях.

3. Анализ имеющихся данных, приведенных выше, показывает, что во время оледенений происходило не только понижение температуры и не только снижение уровня океана на 100—120 м, но и обнажение рыхлых осадков шельфа, т.е. превращение его в новую крупную область развивания (питания аэрозолей). Это одна из причин роста содержания аэрозолей в атмосфере для ледниковых этапов в 3—5 раз и более (по сравнению с современным). Рассеянный аэрозольный и ледовый (айсберговый, т.е. криозольный) материал становился главным в питании океана осадочным веществом и в потоках аэрозольного вещества на разных уровнях атмосферы над океаном, т.е. горизонтальный и вертикальный перенос аэрозолей резко усиливался, росли не только потоки аэрозольного вещества, но и площади его распространения, частота пылевых бурь.

4. Для недавних этапов истории важное значение имеет изучение распределения в атмосфере радиоактивных элементов (элементы-маркеры), связанных с атомными взрывами в атмосфере, катастрофой в Чернобыле и др.

РАСТИТЕЛЬНОСТЬ И ЖИВОТНЫЙ МИР ОКЕАНСКИХ ПУСТЫНЬ И ОСАДОЧНЫЙ ПРОЦЕСС. ПОСТАВКА И ОСАЖДЕНИЕ БИОМИНЕРАЛОВ В АРИДНЫХ ЗОНАХ

Океанские пустыни (аридные зоны) выделяются не только по главной роли эоловых процессов в подготовке, транспортировке и отложению минеральной части осадочного вещества, о чем говорилось выше. Еще ярче области океанских пустынь выявляются при рассмотрении биогенной части процессов — образовании карбонатных и кремнистых биоминералов и органического вещества ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + 2\text{C}_{\text{орг}}$).

В настоящее время имеется несколько независимых способов оценки количества осадочного вещества биогенной природы. Важно подчеркнуть, что они определяются сейчас количественно по процессам, протекающим в верхнем освещенном (деятельном) слое толщиной до 150 м. Именно здесь в ходе фотосинтеза производится первичное органическое вещество, которое далее через пищевые цепи передается на глубины вплоть до дна.

Интенсивность фотосинтеза — подготовка пищевой базы для развития организмов, имеющих карбонатные или кремнистые панцири, определяется первичной продукцией, т.е. скоростью образования углерода на единице поверхности океана в единицу времени ($\text{мг C/см}^2/\text{сут}$), т.е. это также единица потока, которая используется для количественной характеристики биогенного взвешенного рассеянного осадочного вещества. В настоящее время с применением спутников, прямых и дистанционных определений хлорофилла, а также прямых определений первичной продукции в рейсах удалось составить достаточно надежные карты для всего Мирового океана — континентов для времени рейса, месяца, сезона, года. Значения годовой первичной продукции меняются в 5—10 раз: от высокопродуктивных эвтрофных областей (до $800 \text{ мг C/м}^2/\text{сут}$) до низкопродуктивных — олиготрофных (меньше 150).

Аридные области на таких картах очень четко обрисовываются как океанские пустыни с минимальной продукцией (менее $150 \text{ мг C/м}^2/\text{сут}$). Нужно подчеркнуть, что эти олиготрофные области совпадают с областями минимальных выпадений атмосферных осадков и с разностью испаряемость — испарение (см. рис. 4). Они протягиваются параллельно экватору, образуя две аридные зоны — северную и южную (см. карту на рис. 5). Карта первичной продукции приводилась ранее [Лисицын, 2004б].

Эти карты опровергают представления о гомогенности океана, которые сохраняются у многих литологов и в наше время.

Очень важно подчеркнуть первую особенность, характерную для пустынь суши и океана, здесь биогенные процессы едва проявляются, это области минимального развития жизни, минимальной первичной продукции углерода.

Вторая особенность касается вещественного состава осадочного вещества аридных зон — здесь нет кремнистых осадков, это царство карбонатов. Исключением являются ограниченные по площади области апвеллингов — области подъема глубинных вод, богатых биогенными элементами, расположенные на шельфе или в верхней части материкового склона.

Третья особенность касается вертикального распределения карбонатных отложений. Это явление критической глубины карбоната накопления, которая зависит от ряда факторов и в среднем составляет около 4500 м [Лисицын, Петелин, 1970; Лисицын, 1978]. Ниже этой глубины карбонатный материал растворяется. Здесь царство карбонатных осадков (с заметной примесью эолового материала) сменяется царством тонкого (пелитового) эолового материала, красных глубоководных глин. Эти процессы перехода карбонатных (кокколито-фораминиферовых и кокколитовых) осадков в глины прослежены для всех океанов. Наиболее четко они выражены в Тихом океане.

Отсюда четвертая закономерность: вертикальная зональность распределения донных осадков, которая проистекает из климатической приуроченности карбонатов к аридным зонам, и развитие здесь в поверхностных слоях воды именно карбонатного планктона. В пределах карбонатных аридных зон распределение красных глин определяется критическими глубинами. Выше этих глубин преобладают биогенные карбонаты (кокколитофориды, фораминиферы и др.). При удалении CaCO_3 кислотой осадок превращается в красную глубоководную глину.

Океанские пустыни связаны не с недостатком воды, как на суше, а с недостатком биогенных элементов, которые обычно в других зонах поступают с речными водами и дождями. Это подчеркивается явлением апвеллинга: при поступлении в деятельный слой аридных зон достаточного количества биогенных элементов (из богатого ими глубинного слоя) в океанских пустынях возникают «оазисы жизни» — апвеллинги.

Еще одной характерной особенностью аридной зоны в океанах и морях является развитие коралловых построек. Это удивительный биоценоз коралловых полипов и водорослей (халимеда). Водоросли за счет фотосинтеза производят органическое вещество, необходимое для частичного питания полипов, а другая часть полипов питается за счет улавливания планктона. Продукты жизнедеятельности полипа дополняют необходимые для водорослей биогенные элементы.

Распространение кораллов ограничено освещенностью слоя их обитания. В мутных водах (близ устьев рек или зон апвеллингов) коралловые постройки угнетаются или исчезают. Также ослабевает фотосинтез водорослей с ростом глубины, эти части постройки перестают развиваться [Лисицын, Петелин, 1970].

Все сказанное показывает, что природа аридных зон океана существенно отличается от соседних гумидных, причем не только температурой и атмосферными осадками, но и планктоном, прозрачностью вод, содержанием (и составом) рассеянного осадочного вещества, биогенных и других элементов, а также поступлением осадочного вещества (взвешенного и растворенного) с суши и обменом вещества с другими геосферами.

Единый океанский бассейн разделяется на природные зоны, как и материки, причем зоны суши продолжают в океанах, хотя выражены там по-своему в соответствии с четырьмя законами зональности седиментации в Мировом океане Безрукова—Лисицына.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удалось разработать новые методы и приборы, которые дают возможность количественно определить и извлечь для исследования рассеянное осадочное вещество атмосферы. Его особенности: малая концентрация (в среднем для океана 0.01 мг/м^3), тонкость частиц (1—2 мкм и мельче), повсеместность (образует пылевое облако планеты). Удастся выделить три высотных уровня аридной седиментации: 1 — приподный (приземный); 2 — средневысотный (до верхнего уровня облаков, 5—7 км); 3 — высотный (без возможности вымывания частиц атмосферными осадками).

Пылевая продуктивность аридных центров суши может быть количественно охарактеризована числом дней с пылевыми бурями (со снижением видимости до $< 1 \text{ км}$). Это число колеблется от 80.7 в Иране до 0—1 в гумидных зонах. Обычно в 1 м^3 воздуха в нижнем слое содержится более 10 тыс. микрочастиц, вертикальные потоки их осаждения на поверхность моря от менее 10 в гумидных зонах до более $10000 \text{ мг/м}^2/\text{год}$.

Путем прямого сравнительного изучения аэрозольного рассеянного материала в атмосфере, в воде, льдах, снеге и донных осадках удалось изучить на количественном и качественном уровнях ход процессов подготовки, транспортировки и отложения аэрозолей, их взаимодействие с другими видами осадочного вещества (вещества взаимодействующих геосфер).

В настоящее время главных центров подготовки и поставки аэрозольного вещества в океаны имеется четыре. В Северном полушарии: Сахара и Восточно-Азиатский регион, в Южном: Австралия и Южная Америка (Пампа). Общая площадь аэрозольных центров суши — аридные и экстрааридные 27.6 млн км^2 (по другим данным, 31.4 млн км^2), а с полуаридными 66.7 млн км^2 , т.е. около 20 % поверхности суши.

Как и аридные зоны суши, морские располагаются к северу и к югу от экватора.

Области аридной морской (океанской) седиментации расположены в основном в тропической зоне, т.е. на тех же широтах, в тех же природных зонах, что и аридные зоны суши. Главная часть осадочного вещества поступает здесь по воздуху в виде аэрозолей. Осаждаясь на поверхность моря, эти частицы присоединяются к морскому осадочному материалу. Именно аэрозольный материал из всех видов осадочного вещества имеет наибольшую дальность распространения, удалось выявить конкретные пути его трансатлантического и транстихоокеанского распространения, а также неоднократного прохождения вокруг земного шара.

Выявлены три вертикальных уровня и дальности перемещения рассеянного аэрозольного вещества (рис. 32). *Локальный* — в основном это перекачивание и сальтация песков и щебнистых покровов в пустынях (обычно в пределах 0—10 км от источника). Средний вертикальный поток аэрозолей здесь $20—50 \text{ мг/м}^2/\text{год}$. *Региональный* (10—1000 км) с подъемом аэрозолей до верхней кромки облаков (около 5—7 км) и выше кромки. В ходе переноса частиц пески алеврита и пелита обычно происходит гранулометрическая дифференциация по пути переноса (отвеивание). Песчаные фракции остаются в пустынях или в локальных выпадениях, далее возникает пояс алевритов (лессов), а еще дальше от центра разветвления — пояс пелитов (эоловая дифференциация). При региональном переносе дальность достигает 1000 км, вертикальный поток аэрозолей — $1—20 \text{ мг/м}^2/\text{год}$. *Дальний* — *глобальный* (более 1000 км и трансокеанский) возникает при выбросах тонкого (пелитового) материала ураганами выше слоя вымывания облаками (5—7 км), средние потоки $< 1 \text{ мг/м}^2/\text{год}$.

Для эоловых процессов выявлена уникальная особенность распространения — не по определенным руслам (как реки), а в виде облаков аэрозолей или с ураганами также без привязки к постоянному руслу.

Поставка, связанная с захватом вещества на суше ураганами, пылевыми бурями и торнадо, т.е. прерывистая, залповая, происходит только в аридных или семиаридных зонах, не закрепленных расти-

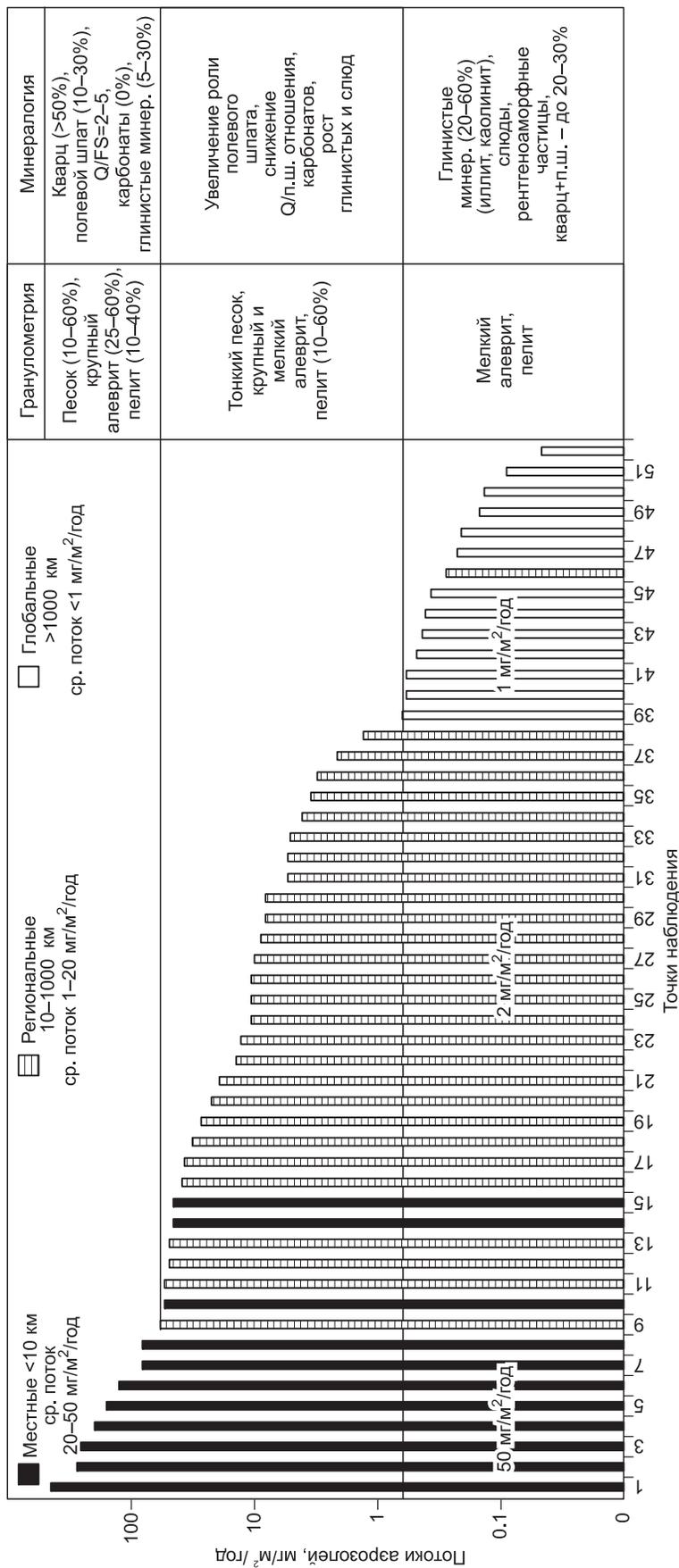


Рис. 32. Изменения вертикальных потоков аэрозолей ($\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$), гранулометрического и минерального составов в зависимости от дальности переноса в атмосфере [Лисицын, 1978; Lawgense, Neff, 2009].

Определения на 52 точках на островах и на суше на протяжении 1—30 лет. Средние локальные потоки аэрозолей $50\text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$, региональные — $2\text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$, глобальные — $1\text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$, т.е. сравнительно с локальным снижение в 50 раз. Это приблизительно соответствует соотношению скоростей шельфовых донных осадков и пелагических глин океана (особенно красной глубоководной глины аридных зон океана $1\text{—}3\text{ мм}/1000\text{ лет}$).

По химическому составу глобальный аэрозоль близок к этим глинам и к составу верхнего слоя континентальной коры. Это средний состав пылевого облака Земли и пелагических осадков с глубин более 4.5 км (средняя критическая глубина).

тельностью, а перенос идет в соответствии с путями тропических циклонов и ураганов в основном в тропических зонах как суши, так и Мирового океана. Аридные зоны суши в Северном и Южном полушариях продолжают аридными зонами океана и разделяются гумидной экваториальной зоной (ITCZ).

Области аридной морской седиментации занимают около 1/3 площади поверхностных вод и современных донных осадков Мирового океана, т.е. имеют глобальное значение. Во время оледенений их площадь значительно увеличивалась за счет снижения уровня океана и осушки обнажившихся шельфовых донных осадков (до 20—30 млн км² рыхлых, не закрепленных растительностью), т.е. площадь аридных центров суши почти удваивается.

Общий вклад аридной морской седиментации мне удалось определить в 1.6 млрд т (по экспертным оценкам, что близко и к оценкам других авторов). Это близко к поступлению в пелагиаль речного материала нетто-вещества (за пределами маргинальных фильтров) (1.8 млрд т). Эоловый материал замещает речной в местах, где нет поступления речного, т.е. в аридных зонах.

Для аэрозольного материала характерна максимальная из известных дальность распространения: он не только пересекает океаны по широте, но нередко на больших высотах многократно обгибает земной шар, образуя глобальные зоны, особенно четкие в Северном полушарии, где сосредоточены континенты и находятся самые крупные аридные зоны.

Перенос осадочного вещества идет в слое от поверхности до высот 15—20 км, что доказывается прямым изучением осадочного вещества в кернах бурения горных (до 8 км) и покровных ледников высотой до 4 км (Гренландия, Антарктида), а также в полетах высотных самолетов и по определениям дистанционными приборными методами (лидары и др.). В настоящее время в связи с регулярными рейсами самолетов на высоте 9—11 км исследования аэрозольного материала стали обязательными. Нередко полеты прекращают при опасных концентрациях аэрозолей (извержения вулканов Исландии, пыльные бури в Азии и Сахаре и др.). В море часто отмечается пылевая мгла, снижение видимости или явление «кóса» (желтый песок) в морях Дальнего Востока, Желтом и Красном морях, в «море мрака» Атлантики, красный и желтый или черный снег на островах и побережье.

По гранулометрическому составу главная часть аэрозолей пелитовая (мельче 1 мкм), а ближе к источникам с примесью мелкого, реже крупного алеврита. Песчаные составляющие и щебень остаются в пустынях.

Красные глубоководные глины и другие виды глубоководных донных осадков тропической зоны сложены аэрозольным материалом. Они имеют самые низкие скорости седиментации из известных для океана (< 1 мм/1000 лет), из обломочных минералов характерен тонкозернистый (мельче 1 мкм) кварц. В Тихом океане важное значение приобретает вулканический пепел (влияние активных окраин, т.е. тектонического фактора), который превращается в характерные аутигенные минералы (филлапсит и др.).

Вклад биогенного материала определяется самой низкой в Мировом океане первичной продукцией фитопланктона (лимит биогенных элементов). Аридные зоны океана — это биологические пустыни, в некоторых частях которых возникают морские оазисы, области апвеллингов, подъема в деятельный слой биогенных элементов из глубинных вод (под пикноклином). Апвеллинги характеризуются высокой первичной продукцией, возникновением кокколитофорид и фораминифер, биогенного кремнезема. Главный вид биогенного материала аридных зон — карбонатные панцири, а для бентоса — коралловодорослевые постройки (биоценоз, способный существовать при самых низких содержаниях биогенов).

Многолетние сравнительные исследования центров развеивания аэрозольного вещества на суше и распространения (осаждения аэрозолей) в океаны, анализ их состава и свойств позволили во всей полноте понять особенности морского аридного седиментогенеза, определить как конкретные центры возникновения аридного (аэрозольного) вещества на суше, так и конкретные пути его переноса над океаном, особенности взвеси из водной толщи и места накопления донных осадков аридного типа.

Более того, при долговременных работах в островных аэрозольных лабораториях удается прогнозировать «время прибытия» аэрозольного облака по времени возникновения пылевого урагана на суше (5—7 сут для Северной Атлантики).

Современные исследования с применением комплекса новых методов дают возможность судить также о роли аридной седиментации в морях и океанах геологического прошлого и особенно об их влиянии на климат. Выяснено, что этапы оледенения — это этапы усиления запыленности атмосферы по сравнению с современной в 2—5 раз. Это связано со снижением уровня океана при оледенениях на 100—120 м и осушкой шельфовых отложений, не закрепленных растительностью, их развеиванием.

Привлечение данных по рассеянному формам осадочного вещества в атмосфере, в толще морской воды, в донных осадках, кернах глубоководного бурения в сопоставлении с бурением покровных ледников Антарктиды и Гренландии, почв островов и многие другие методы не только убеждают в существовании особого типа седиментогенеза — морского аридного, но и объясняют его особенности как для

современного этапа, так и для четвертичного времени и более древних этапов. Эти сравнительно-седиментологические исследования только начинаются.

Утверждения о гомогенности океанской среды и однообразии осадочного процесса в океанах опровергаются данными прямых исследований современными методами, убеждают в природной зональности океанской среды и океанских донных осадков в соответствии с идеями В.В. Докучаева и В.И. Вернадского, в существовании глобальных зон морской аридной седиментации.

ЛИТЕРАТУРА

- Вернадский В.И.** Биосфера. М., Издательский дом «Ноосфера», 2001, 243 с.
- Добровольский Г.В., Карпачевский Л.С., Криксунов Е.А.** Геосферы и педосферы. М., ГЕОС, 2010, 190 с.
- Докучаев В.В.** Учение о зонах природы и классификация почв. Сочинения. Т. VI. М., Л., Изд-во АН СССР, 1951, 375 с.
- Емельянов Е.М.** Седиментогенез в бассейне Атлантического океана. М., Наука, 1982, 192 с.
- Заварзин Г.А.** Лекции по природоведческой микробиологии. М., Наука, 2004, 348 с.
- Клювиткин А.А.** Атмосферные аэрозоли и осадконакопление в аридных зонах Атлантического океана // Докл. РАН, 2008, т. 421, № 1, с. 111—115.
- Клювиткин А.А., Лукашин В.Н., Новигатский А.Н., Исаева А.Б., Серова В.В.** Минеральные аэрозоли, их концентрация, состав и потоки на океанскую поверхность // Океанология, 2004, т. 44, № 5, с. 1—12.
- Клювиткин А.А., Дара О.М., Новигатский А.Н., Политова Н.В., Клювиткина Т.С.** Минеральный состав атмосферных аэрозолей Атлантики по материалам пятилетних исследований // Геология морей и океанов. Материалы XVIII Международной научной конференции по морской геологии. М., ГЕОС, 2009, т. III, с. 47—52.
- Лессовый покров** Земли и его свойства / Ред. В.Т. Трофимов. М., МГУ, 2001, 464 с.
- Лизунов Н.В., Лисицын А.П.** Состав взвеси Берингова моря по данным спектрального анализа // Докл. АН СССР, 1955, т. 104, № 4, с. 593—596.
- Лисицын А.П.** Некоторые данные о распределении взвеси в водах Курило-Камчатской впадины // Труды Института океанологии АН СССР, 1955а, т. 12, с. 62—97.
- Лисицын А.П.** Атмосферная и водная взвесь как исходный материал для образования морских осадков // Труды Института океанологии АН СССР, 1955б, т. 13, с. 16—22.
- Лисицын А.П.** Методика изучения взвеси с геологическими целями // Труды Института океанологии АН СССР, 1956, т. 19, с. 204—230.
- Лисицын А.П.** Распределение и химический состав взвеси в водах Индийского океана // Океанологические исследования. М., Наука, 1964, № 10.
- Лисицын А.П.** Осадкообразование в океанах. М., Наука, 1974, 438 с.
- Лисицын А.П.** Процессы океанской седиментации // Литология и геохимия. М., Наука, 1978, 391 с.
- Лисицын А.П.** Маргинальный фильтр океанов // Океанология, 1994, т. 34, № 5, с. 735—743.
- Лисицын А.П.** Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, с. 163—249.
- 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—534.
- Лисицын А.П.** Геология Мирового океана в третьем тысячелетии — новые подходы, достижения и перспективы // Новые идеи в океанологии. М., Наука, 2004а, т. 2, с. 7—67.
- Лисицын А.П.** Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика, 2004б, т. 45 (1), с. 15—48.
- Лисицын А.П., Петелин В.П.** Коралловые рифы и связанные с ними осадки // Тихий океан. Кн. 2. М., Наука, 1970, с. 69—107.
- Лисицына Н.А., Бутузова Г.Ю.** Цеолиты в осадках литологического профиля через Тихий океан // Литология и полезные ископаемые, 1976, № 2, с. 9—21.
- Лосев К.С.** Вода. Л., Гидрометеиздат, 1989, 272 с.
- Лукашин В.Н., Иванов Г.В., Полькин В.В., Гурвич Е.Г.** О геохимии аэрозолей в тропической Атлантике (по результатам 35-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш») // Геохимия, 1996, № 10, с. 985—994.

- Лукашин В.Н., Шевченко В.П., Демина Л.Л., Серова В.В., Иванов Г.В.** Распределение и состав эоловой взвеси над океанами // Международный симпозиум по аэрозолям. М., 1994, с. 73—74.
- Лукашин В.Н., Шевченко В.П., Лисицын А.П., Серова В.В., Иванов Г.В.** Распределение, вещественный и химический состав аэрозолей над западной частью Тихого океана // *Океанология*, 1996, № 2, с. 288—298.
- Лукашин В.Н., Люцарев С.В., Краснюк А.Д., Шевченко В.П., Русаков В.Ю.** Взвешенное вещество в эстуариях Оби и Енисея (по материалам 28-го рейса НИС «Академик Борис Петров») // *Геохимия*, 2000, т. 12, № 3-1, с. 1329—1345.
- Лукашин В.Н., Исаева А.Б., Серова В.В., Николаева Г.Г.** Геохимия осадочного вещества и его потоки в восточной части Экваториальной Атлантики // *Геохимия*, 2002, № 3, с. 306—318.
- Мейзе П.** Распределение на земном шаре аридных и полуаридных климатов // *Гидрогеология и гидрология аридной зоны земного шара*. М., Наука, 1955, с. 48—67.
- Михайличенко В.Н.** Горные ледники Центральной Азии // *Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом*. М., Наука, 2007, с. 150—164.
- Оледенение** Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ред. В.М. Котляков. М., Наука, 2006, 482 с.
- Петров М.П.** Пустыни земного шара. Л., Наука, 1973, 253 с.
- Разжигаетова Н.Г., Ганзей Л.А.** Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцене—голоцене. Владивосток, Дальнаука, 2006, 365 с.
- Серова В.В.** Минералогия эоловой и водной взвеси Индийского океана. М., Наука, 1988, 174 с.
- Соломина О.Н.** Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М., Научный мир, 1999, 272 с.
- Соломина О.Н.** Голоценовые колебания ледников Северной Евразии в глобальном контексте // *Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем*. М., Наука, 2007, с. 167—178.
- Страхов Н.М.** Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М., Госгеолтехиздат, 1963, 535 с.
- Страхов Н.М.** К вопросу о типах литогенеза в океанском секторе Земли // *Литология и полезные ископаемые*, 1976, № 6, с. 3—20.
- Тримонис Э.С.** Терригенная седиментация в Атлантическом океане. М., Наука, 1995, 255 с.
- Хрусталев Ю.П.** Закономерности современного осадконакопления в Северном Каспии. Ростов-на-Дону, Рост. ун-т, 1978, 208 с.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Купцов В.М., Ван-Малдерен Г., Мартэн Ж.-М., Ван-Грикен Р., Хуан В.В.** Состав аэрозолей в приводном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // *Океанология*, 1999, т. 39, № 1, с. 142—151.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р.** Аэрозоли Арктики — результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосферы и океана*, 2000, т. 13, № 6/7, с. 551—576.
- Шимкус К.М.** Процессы осадконакопления в Средиземном и Черном морях в позднем кайнозое. М., Научный мир, 2005, 280 с.
- Bonatti E.** Palagonite, hyaloclastites and alteration of volcanic glass in the ocean // *Dull. Volcanol.*, 1965, v. 28, p. 74—86.
- Bonatti E., Arrhenius G.** Eolian sedimentation in the Pacific of Northern Mexico // *Marine Geol.*, 1965, v. 3, p. 337—348.
- Brust J., Wainek J.** Atmospheric clust contribution to ocean sea particle flux in the subtropical Northwest Atlantic // *Deep Sea Res.* 1, 2010, v. 57, p. 988—998.
- Chester R., Elderfield H., Griffin J., Johnson L.R., Padgham R.C.** Eolian dust along the eastern margins of the Atlantic Ocean // *Marine Geol.*, 1972, v. 13, № 2, p. 91—106.
- Delany A.C., Parckin D.W., Griffin J.J., Goldberg E.D., Reimann B.E.** Airborne dust collected at Barbados // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, 31, p. 885—909.
- Duce R.A., Arimoto R., Ray B.J., Unni C.K., Harder P.J.** Atmospheric trace elements at Enewetok Atoll: concentrations, sources and temporal variability // *J. Geophys. Res.*, 1983, v. 88, p. 5321—5342.
- Elmore A.C., Thunell R.C., Styles R., Black D., Murray R.W., Martinez N., Astor Y.** Quantifying the seasonal variations and fluvial and eolian sources of terrigenous material in Cariaco Basin, Venezuela // *J. South. Amer. Earth. Sci.*, 2009, v. 27, p. 197—210.
- Glaccum R.A., Prospero J.M.** Saharan aerosols over the tropical North Atlantic: mineralogy // *Marine Geol.*, 1980, 37, 295—321.
- Greaves M.J., Elderfield H., Sholkovitz E.R.** Eolian sources of rare earth elements to the Western Pacific Ocean // *Marine Chem.*, 1999, v. 68, p. 31—37.

Guerzoni S., Molinaroli E., Chester R. Saharan dust inputs to the western Mediterranean Sea: depositional patterns, geochemistry and sedimentological implications // *Deep-Sea Res. II*, 1997, v. 44, № 3—4, p. 631—654.

Hagen L.J., van Pelts, Sharratt B. Estimating the saltation and suspension components from field wind erosion // *Aeolian Res.*, 2010, v. 1, p. 147—153.

Holmes C.W., Miller R. Atmospherically transported elements and deposition in the southeastern United States: local or transoceanic? // *Appl. Geochem.*, 2004, v. 19, p. 1189—1200.

Hovan S.A., Rea D.K., Piasias N.G. Late Pleistocene continental climate and oceanic variability recorded in North Pacific sediments // *Paleoceanography*, 1991, v. 6, № 3, p. 349—370.

Huzar R., Tratt D., Schichter B., Falke S.R., Westphal D., Hobben B.N., Guegmard C., McKendry I., Kuring N., Feldman G.C., McClain C., Frouin R.I., Merrill Z., Du Bois D., Vignola F., Murayama T., Nickovic S., Wilson W.E., Sassen K., Sugimoto N., Malm W.C. Asian dust events of April. 1998 // *J. Geoph. Res.*, 2001, v. 106, № d16, p. 18317—18330.

Jaffe D.A., Anderson T., Covert D., Kotchenruther R., Trost B., Danielson J., Simpson W., Bernsten T., Karlsdottir S., Blake D., Harris J., Carmichael G., Uno I. Transport of Asian air pollution to North America // *Geophys. Res. Lett.*, 1999, v. 26, p. 711—714.

Kaiser J., Lamy F. Links between Patagonian Ice Sheet fluctuations and Antarctic dust variability during the last glacial period (Mis 4-2) // *Quat. Sci. Rev.*, 2010, v. 29, p. 1464—1471.

Lawrence C.R., Neff J. The contemporary physical and chemical flux of Aeolian dust: a synthesis of direct measurements of dust deposition // *Chem. Geol.*, 2009, v. 267, p. 46—63.

Liu T.S. Loess and the environment. China Ocean, Beijing, 1985, 251 p.

Miyake Y., Sugimura Y., Katsuragi Y. Radioactive fallout in Asahikawa, Hokkaido in April 1955 // *J. Meteor. Soc. Japan. Ser 2*. 1956, v. 34, № 4, p. 226—227.

Parrington J.R., Zoller W.H., Aras N.K. Asian dust: seasonal transport to the Hawaiian Islands // *Science*, 1983, v. 220, p. 195—197.

Prospero J.M. Atmospheric dust studies on Barbados // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1968, v. 49, № 6.

Pye K. Aeolian dust and dust deposit. London, Academic Press. Processes of fine particle formation, dust source regions, and climatic changes. 1987, 334 p.

Rea D.K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: the geologic history of wind // *Rev. Geoph.*, 1994, v. 32, p. 159—195.

Stancin A., Gleason J., Havan S., Rea D., Owen R., Moore T., Hall C., Blum J. Miocene to recent dust record from the southwest Pacific Ocean at 40°S latitude // *Paleoceanogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 2008, v. 261, № 3—4, p. 218—233.

Stuut J.B., Smalley I., O'Hara-Dhad K. Aeolian dust in Europe: African sources and European deposits // *Quatern. Inter.*, 2009, v. 198, p. 234—245.

Sun J. Provenance of loess material and formation loess deposits on the Chinese Loess Plateau // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 203, p. 845—859.

Sun J., Zhu X. Temporal variation in Pb isotopes and trace element concentrations within Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: implications for provenance change // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, v. 290, p. 438—447.

Swap R., Ulanski S., Cobbet M., Garstand M. Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks // *J. Geoph. Res.*, 1996, v. 101, № d2, p. 4205—4220.

Uno I., Amano H., Emori S., Kinoshita K., Matusi I., Sugimoto N. Trans-Pacific yellow dust transport observed in April 1998. A numerical simulation // *J. Geoch. Res.*, 2001, v. 106, № d16, p. 18331—18344.

Zabel M., Wagner T., de Menocal P. Terrigenous signals in sediments of the low-latitude Atlantic — implications of environmental variations during the Quaternary Part II: Lithogenic matter // *Sonderforschungsbereich*, 2003, v. 261, p. 323—345.

Zhou M., Haiping Lu. Characterisation of atmospheric aerosols and of suspended particles in seawater in the western Pacific Ocean // *J. Geoph. Res.*, 1992, v. 97, № d7, p. 7553—7567.

*Поступила в редакцию
27 июня 2011 г.*