

УДК 553.64 : 551.351

ФОСФОРИТОНОСНОСТЬ ОКРАИН ОКЕАНОВ

БАТУРИН Г. Н.

Выполнено обобщение основных материалов по распространению, условиям залегания, литологии, химическому составу, возрасту и ресурсам фосфоритов на дне окраинных зон Атлантического, Тихого и Индийского океанов. Рассмотрены современные представления о генезисе фосфоритов окраинных зон океанов с учетом имеющихся палеоокеанологических реконструкций, геохимических и изотопных данных. Оценены перспективы дальнейшего исследования и возможного практического освоения ресурсов океанских фосфоритов.

Фосфориты на дне океана были впервые обнаружены экспедицией на «Челленджере» 1872—1876 гг. [40]. За прошедший с тех пор более чем 100-летний период получено большое число сведений о их составе, распространении и условиях залегания, чему был посвящен ряд обобщающих работ [3, 19, 21, 22, 32]. В нашей стране эти исследования были впервые поставлены в Институте океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР по инициативе и при поддержке П. Л. Безрукова.

Задача настоящей статьи — описание накопившихся к настоящему времени данных о распространении и составе фосфоритов в пределах окраинных зон океанов, непосредственно примыкающих к континентальным областям, которые могут явиться потребителем этого потенциально-го минерального сырья океана. Места основных находок фосфоритов на дне окраинных зон океана приведены на схеме (фигура).

К фосфоритам отнесены породы и осадки с содержанием $P_2O_5 > 12\%$, но в отдельных случаях для полноты картины рассматриваются также слабифосфатные породы с содержанием $P_2O_5 \sim 10\%$.

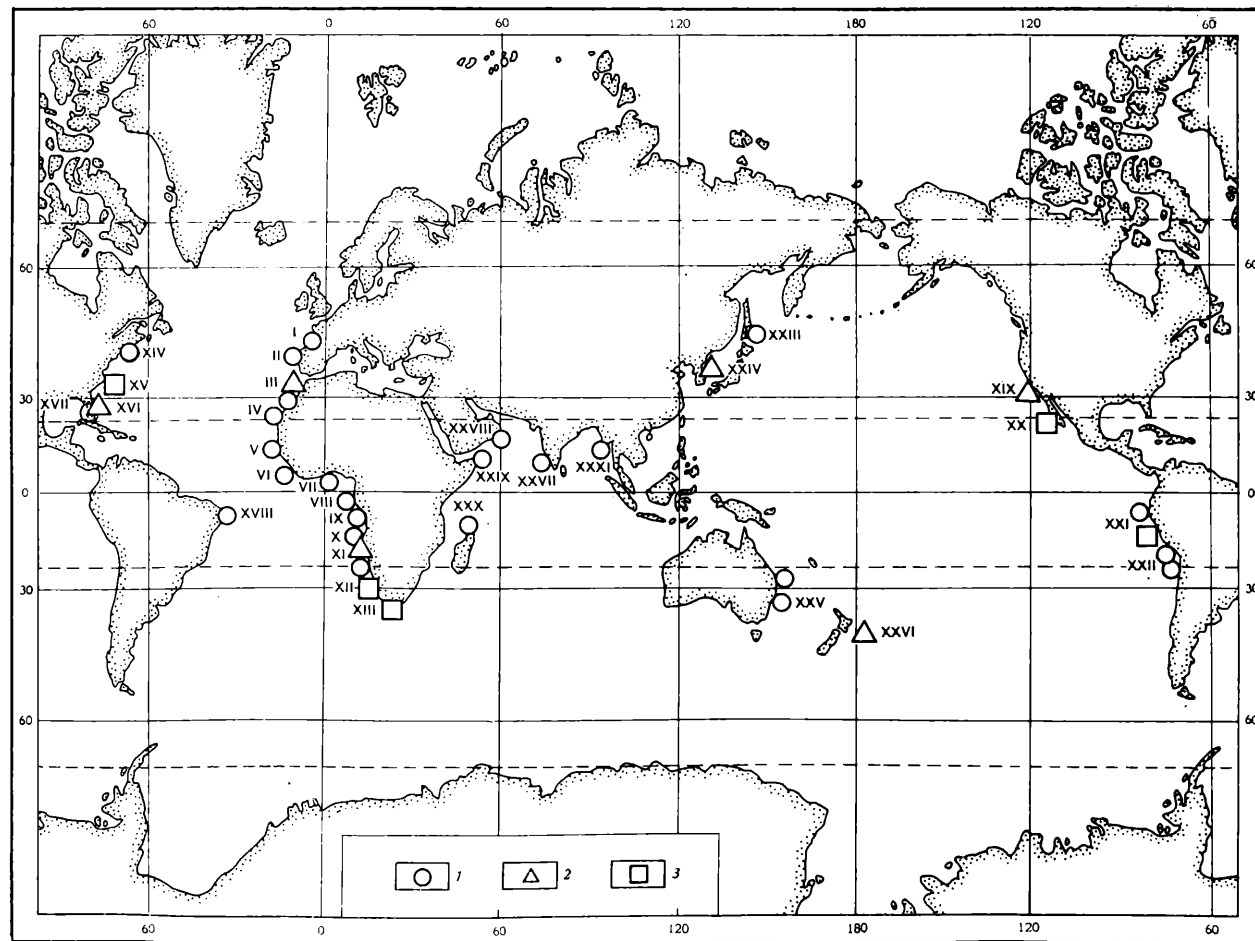
В связи с отсутствием общепринятой номенклатуры фосфоритов их описание приводится согласно первоисточникам без попытки всеобъемлющей литологической унификации.

ФОСФОРИТЫ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Фосфориты вдоль восточной периферии Атлантики распространены от северных берегов Испании и Португалии до южной оконечности Африки, вдоль западной периферии — от банок Ньюфаундленд и Джорджес на севере до шельфа Бразилии на юге, хотя полное описание всех находок отсутствует.

На континентальном склоне Испании и Португалии фосфориты встречаются на глубинах от 200 до 1945 м, чаще до 600 м, и представлены желваками различной формы диаметром 2—6 см. Содержание P_2O_5 составляет 6,43—21,50%; нефосфатные компоненты — кальцит, кварц, гётит, доломит; возраст предположительно миоценовый, ресурсы не установлены [27, 35].

На шельфе и верхней части континентального склона Марокко и Испанской Сахары фосфориты распространены во многих районах на глубинах от менее 200 до 750 м и представлены известковыми песками, с фосфатными зёрнами и конгломератами. Пески содержат до 7,9% P_2O_5 , а в пересчете на бескарбонатное вещество — до 20% P_2O_5 . Фосфоритовые конгломераты встречаются на глубинах 150—300 м в виде стяжений неправильной формы, угловатых обломков и глыб. Их структура псефитовая, текстура массивная или неяснослоистая. Галька конгломератов размером от менее 1 до 8 см в поперечнике не сортирована и представляет собой глауконитовые песчаники с обломками зернистых фосфоритов,



Распространение фосфоритов на окраинах океанов

1 — находки фосфоритов с неустановленными ресурсами; 2 — ресурсы 50—500 млн. т. P_2O_5 ; 3 — ресурсы более 500 млн. т P_2O_5 . Значки с точкой в центре относятся к голоцен-позднечетвертичному возрасту; заливные наполовину — к миоцен-плиоценовому; залитые полностью — к возрасту древнее миоценового; незалитые — неизвестному. Районы распространения фосфоритов: I — шельф и континентальный склон Испании; II — шельф и континентальный склон Португалии; III — шельф Марокко; IV — шельф Испанской Сахары; V — шельф Сенсгала; VI — шельф Гвинеи; VII — шельф Ганы; VIII — шельф Габона; IX — шельф Конго; X — шельф Анголы; XI — шельф Намибии; XII — шельф ЮАР; XIII — банка Агульяс; XIV — банка Ньюфаундленд; XV — шельф Джорджии и Северной Каролины; XVI — плато Блейк; XVII — терраса Пуртале; XVIII — плато Пернамбуко; XIX — Калифорнийский бассейн; XX — шельф Мексики; XXI — шельф и континентальный склон Перу; XXII — шельф и континентальный склон Чили; XXIII — шельф Сахалина; XXIV — подводные возвышенности Японского моря; XXV — шельф Австралии; XXVI — подводное поднятие Чатам; XXVII — шельф Индии; XXVIII — континентальный склон Аравийского полуострова; XXIX — шельф о-ва Сокотра; XXX — атоллы Космоledo; XXXI — шельф Амирантских островов

фосфатными ядрами фораминифер, зернами кварца, полевых шпатов и пирита. Цемент пород известково-фосфатный с включениями зерен кальцита, кварца, глауконита, доломита и гидроокислов железа.

Фосфориты, распространенные на современном шельфе, вымыты из пород различного возраста: верхнемеловых (фосфатизированные известняки), эоценовых (фосфатные зерна, конгломератовидные фосфориты) и миоценовых (глауконитовые и конгломератовидные фосфатизированные известняки). Площадь распространения фосфатных осадков на шельфе северо-западной части Африки оценивается в 3300 км², мощность — 5 м, ресурсы — 430 млн. т Р₂О₅ [47, 49]. Отдельные находки фосфоритов известны и на шельфе Сенегала [16].

У побережья Центральной Африки фосфориты найдены на шельфах Гвинеи, Ганы, Габона, Конго и Анголы [3, 16, 18, 28, 50]. Фосфориты представлены фосфатизированными известняками, песчаниками, копролитами, костным детритом.

На шельфах Габона и Конго известны известняковые охры с карбонатно-фосфатным цементом, содержащие 20—40% фосфатных зерен; слабофосфатизированные песчаники с цементом различного состава; осадки с костным детритом и фосфатизированными копролитами, содержащие до 20% Р₂О₅, залегающие на глубинах 35—45 м. При поисковых работах 1982 г. здесь было взято 142 колонки длиной до 7,3 м вибропоршневыми трубками на площади 360 км². В половине колонок присутствуют миоценовые фосфориты — пески и желваки, образующие несколько маломощных линз и один протяженный слой мощностью 15 см. Ресурсы фосфоритов пока не определены, но продолжение поисков стимулируется малой глубиной залегания фосфоритов, близостью порта Пуэнт Нуар, легкостью эрлифтной добычи и обогащения, высоким качеством фосфоритов.

Фосфориты на шельфе и в верхней части континентального склона Намибии представлены фосфатными песками, плитами и глыбами фосфатных пород, плотными конкрециями и рыхлыми фосфатными стяжениями, костями рыб и морских млекопитающих, фосфатизированными копролитами. Фосфатные пески на различных участках внешнего шельфа содержат 30—74% фосфатных зерен при суммарном содержании Р₂О₅ 6—23%. Медианный диаметр фосфатных зерен 0,15—0,31 мм, коэффициент сортировки 1,52—2,86, удельный вес 2,50—2,90, среднее содержание Р₂О₅ 32,2% [9, 15]. Плиты, глыбы и плотные крупные конкреции миоценовых фосфоритов распространены на северном и южном участках этой зоны: 18—26° ю. ш. (глубины 115—335 м) и 30—33° ю. ш. (глубины 250—1000 м). Эти разновидности фосфоритов залегают на перемытых терригенно-известковых осадках и представлены преимущественно мелкозернистыми, а также брекчиевидными и конгломератовыми разностями [3, 16, 20].

В голоценовых диатомовых илах внутреннего шельфа Намибии на глубинах 60—120 м в полосе от 18 до 23° ю. ш. распространены современные фосфатные стяжения, образующие полный генетический ряд от слабофосфатизированных илов до постепенно уплотняющихся рыхлых и плотных конкреций.

Опробование осадков всего шельфа по материалам 900 станций показало, что участок фосфатных песков с наиболее высоким содержанием Р₂О₅ (>15%) расположен между 24 и 25°30' ю. ш. на внешнем шельфе, на глубине около 200 м [48]. Суммарные ресурсы фосфоритов составляют здесь около 100 млн. т Р₂О₅. Ряд менее крупных участков с содержанием Р₂О₅ 5—15% прослеживается вплоть до 34° ю. ш.

Фосфориты на подводной окраине Южной Африки представлены слабофосфатными (с глауконитом) песками (до 10% Р₂О₅), желваковыми, конгломератовыми и брекчиевидными разностями [16, 20, 42]. В брекчиевидных и конгломератовидных фосфоритах присутствуют обломки и гальки фосфатизированных фораминиферовых известняков и известково-железистых фосфоритов, сцементированных фосфатно-известковой или фосфатно-известково-железистой массой. Желваковые фосфориты

представлены фосфатизированными известняками и песчаниками псаммитовой структуры, состоящими из зерен фосфата, глауконита, кварца и полевых шпатов, сцементированных глинисто-известково-фосфатной массой. Содержание P_2O_5 в фосфоритах и слабофосфатизированных породах колеблется от 0,3 до 24%. Фосфориты преимущественно переотложенные (вымыты из третичных пород), распространены неравномерно. При драгировании поднимали от <1 до 100 кг фосфоритов. Возраст содержащейся в фосфоритах микрофауны преимущественно среднемиоценовый. Суммарные ресурсы P_2O_5 в фосфоритах и фосфатизированных породах этого района (банка Агульяс и юго-западный шельф ЮАР) на площади около 35 тыс. км² составляют, по оценке южноафриканских геологов [20], ~9 млрд. т.

Фосфориты западной периферии Атлантики распространены главным образом на восточном шельфе США (штаты Джорджия и Северная Каролина), где они связаны с отложениями миоценовой формации Панго Ривер.

Детальное исследование с помощью вибропоршневых трубок (около 100 колонок, 600 м керна) двух мелководных (15—26 м) участков в заливе Онслоу (шт. Северная Каролина) показало, что разрез состоит из нескольких циклов перемежающихся прослоев фосфатных песков, слабофосфатных песков, доломитовых алевроитов и кварцевых песков. Из восьми слоев, содержащих фосфатные зерна, перспективными признаны пять. Наиболее богатый представлен оливково-зеленым песком, состоящим из фосфатных зерен (50—75%), раковин фораминифер (10%) и незначительной (10%) примеси кварцевых зерен. Общая мощность фосфатноносных отложений колеблется от нескольких сантиметров до 9—12 м, мощность перекрывающих их нефосфатных осадков — от 0 до 24 м; содержание P_2O_5 от 4,8 до 22,9, в среднем 12,4%. Ресурсы фосфатного концентрата (24,6—29,4% P_2O_5) на площади около 840 км² оценены здесь в 1,5 млрд. т, общие ресурсы P_2O_5 на площади 1600 км² — 1,3 млрд., но значительная часть площади распространения на шельфе отложений фосфоритоносной формации Панго Ривер (150×40 км) исследована пока недостаточно [45].

Фосфориты на подводной террасе Пуртале, к югу от п-ова Флорида, распространены на площади 70×5 миль и представлены конкрециями, конгломератами, обломками фосфатизированных известняков и фосфатизированными костями. По геологическим данным, эти фосфориты являются аналогами миоценовых фосфоритов формации Боун Вэлли во Флориде [29].

Фосфориты на плато Блейк приурочены к его северо-западной мелководной части и представлены зернами, конкрециями и глыбами массой >100 кг, содержащими от 20 до 26% P_2O_5 . Судя по эродированной поверхности дна, фосфориты сконцентрировались при размыве фосфатноносных миоценовых отложений прибрежной равнины, после чего произошло погружение плато. Ресурсы фосфоритов составляют 2 млрд. т породы при содержании в ней 30—40% нефосфатных примесей [36].

Фосфориты на западной периферии Атлантики распространены также в пределах подводного плато Пернамбуко в 60 милях от берега (8° ю. ш. — 34° з. д.), где они залегают на глубинах 1750—2200 м и представлены конкрециями диаметром 2—12 см с фосфатными ядрами и железомарганцевыми корками. Ядра состоят из фосфатизированного глобигеринового ила палеоцен-эоценового возраста и содержат 14,7—28,8% P_2O_5 [39].

ФОСФОРИТЫ ТИХОГО ОКЕАНА

Наиболее детально изученным фосфатноносным районом Тихого океана является шельф и континентальный склон шт. Калифорния [26]. Фосфориты встречены на внешней части континентального шельфа, островных шельфах, вершинах и склонах подводных банок и холмов, склонах котловин и подводных каньонов (на глубинах от 80 до 2800 м, обычно не более 330 м). Фосфориты представлены зернами, конкрециями, кон-

гломератами, глыбами размером до $60 \times 50 \times 20$ см; средний размер конкреций 5 см. Концентрация фосфоритов на дне, по данным подводного фотографирования, составляет от первых килограммов до 100 кг/м^2 . Фосфориты содержат P_2O_5 20—30%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \sim 1\%$, нерастворимый остаток — от 2 до 21%. Выделяются две возрастные генерации фосфоритов: основная (средний — поздний миоцен) и второстепенная (поздний плиоцен — ранний плейстоцен). При площади распространения фосфоритов около 6000 миль^2 их ресурсы составляют приблизительно 1 млрд. т, или около 300 млн. т P_2O_5 [26].

На западном шельфе Калифорнийского полуострова (Мексика) фосфориты распространены в полосе шириной до 80 км между 24 и 26° с. ш. на глубинах до 100 м, а также на пляжах и в лагунах. Фосфориты представлены фосфатными песками, содержащими 15—40% фосфатных зерен, хорошо сортированных. Во фракции 0,125—0,250 мм преобладают черные овоидные зерна, более крупные фракции состоят из биогенного детрита — обломков фосфатных раковин брахиопод. Среднее содержание P_2O_5 в фосфатных зернах составляет 30,2%. Фосфатные пески являются реликтами полностью размытых доголоценовых отложений, возможно, плиоцен-плейстоценового возраста. Площадь распространения фосфатных осадков с содержанием апатита $>5\%$ оценена в 1800 км^2 , мощность этих осадков, по данным бурения, около 20 м, ресурсы P_2O_5 от 1,5 до 5 млрд. т [25].

В пределах подводной окраины (Перу — Чили) фосфориты распространены на шельфе и континентальном склоне в полосе протяженностью около 1700 км от 5 до 21° ю. ш. Фосфориты представлены зернами, конкрециями разнообразной формы и размеров, в том числе сrostковыми, плитами, костями рыб и морских млекопитающих, фосфатизированными копrolитами. Среди конкреций и зерен встречаются, как и на шельфе Намибии, слабоконсолидированные разности с постепенными переходами к более плотным. Параллельно литификации меняется состав стяжений — увеличивается содержание фосфатных и уменьшается содержание нефосфатных компонентов. В целом для фосфоритов характерно присутствие значительного количества биогенного, терригенного и вулканогенного материала, что связано с геологическим строением района и режимом седиментации на преимущественно крутом склоне. Содержание фосфатного материала в фосфоритах составляет обычно 20—40, кварца 5—30, карбонатов до 30, полевых шпатов до 22%. Наиболее молодые фосфориты имеют позднечетвертичный (в ряде случаев, вероятно, голоценовый) возраст, древние могут представлять различные возрастные генерации вплоть до миоцена [3]. Ресурсы фосфоритов в этом районе весьма значительны, но их разведка не проводится в связи с освоением крупного месторождения Сечура на континенте.

Фосфориты на подводном поднятии Чатам к востоку от Новой Зеландии распространены на глубинах 285—465 м на площади до 4600 км^2 . Местами слой фосфоритов имеет мощность 15 см. Фосфориты представлены конкрециями неправильной формы размером до 15 см в поперечнике, являющимися по составу фораминиферовым известняком с карбонатным цементом. Известняк и цемент неравномерно замещены фосфатом. Обычными компонентами фосфоритов являются глаукоцит и пирит. Фосфориты содержат 16,5—25,4% (в среднем $\sim 20\%$) P_2O_5 . Выделяются две возрастные генерации фосфоритов: позднеэоценовая — раннсолигоценовая и ранне-, среднемиоценовая. Общие ресурсы фосфоритов оцениваются в 200 млн. т. Ресурсы на одном из детально разведанных участков площадью 140 км^2 составляют 7,5 млн. т при средней продуктивности 54 кг/м^2 , с перспективой увеличения ресурсов до 25 млн. т. при расширении участка [24, 31, 34].

Фосфориты у восточного побережья Австралии встречены на шельфе и верхней части континентального склона на глубинах преимущественно 200—300 м и представлены грубозернистыми песками, конкрециями и глыбами. Состав фосфоритов, которые по принятой в СССР номенклатуре являются фосфатизированными породами, определяется варьирую-

щими соотношениями гётита, апатита, кальцита и глауконита с примесью зерен полевых шпатов и кварца. Содержание в них P_2O_5 составляет 5,6—11,3%. Возраст фосфоритовых конкреций, определенный радиометрическими методами, находится в пределах 50—55 тыс. лет [23, 33, 37].

Фосфориты и фосфатизированные породы в пределах Японского моря обнаружены на шельфе и континентальном склоне Приморья (единичные находки) и распространены преимущественно на подводных возвышенностях и горах, в том числе на Северном и Южном Ямато, Восточно-Корейской возвышенности, поднятиях Ченцова и Криштофовича (на глубинах от 450 до 1800 м). Формы фосфоритов разнообразны: желваки округлой, овальной или уплощенной формы размером 5—20 см по длинной оси, массивные фосфориты плитчатой или неправильной формы до 20 см в поперечнике, фосфоритовые корки на плотных коренных породах, а также разнообразные фосфатизированные псефито-псаммитовые породы. В фосфоритах присутствует переменное количество терригенного материала от тонкоалевритовой до псаммитовой размерности, зерна и выделения глауконита различной формы, органический детрит, пирит. Фосфориты содержат P_2O_5 в количестве 25—31%, фосфатизированные породы — 11—13%. Фосфатный минерал фосфоритов представлен фторкарбонатапатитом, как и в фосфоритах из других районов океана, но для фосфоритов Японского моря характерно высокое содержание лимонно-растворимого фосфора — от 30—50% [1, 2] до 70% [5] его валового количества в породе. Возраст фосфоритов, по геологическим и микропалеонтологическим данным, позднемiocеновый, и основные участки их распространения являются погруженными шельфами миоценового бассейна. Продуктивный базальный горизонт на пологих формах рельефа обычно перекрыт толщей постмиоценовых отложений, которые отсутствуют только на относительно крутых склонах подводных возвышенностей, где драгами поднято от нескольких до десятков килограммов фосфоритов [4, 5, 12]. Единичные находки конкреций фосфоритов известны также на шельфе Охотского моря [14].

ФОСФОРИТЫ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

Фосфориты на дне Индийского океана изучены значительно хуже по сравнению с Атлантическим и Тихим. Имеются описания лишь единичных находок.

На юго-западном шельфе о-ва Сокотра фосфориты залегают на глубине 210 м в углублениях скального основания, лишенного рыхлых осадков. Они представлены конкрециями 2—5 см в поперечнике, содержащими наряду с фосфатом карбонатный биогенный детрит (до 30%), зерна кварца (до 10%) и пирит. Судя по условиям залегания конкреций и их окатанности, фосфориты вымыты из осадочных мезозойско-кайнозойских осадков [7].

Известны также единичные находки фосфоритов у берегов Сомали, на шельфе Западного Индостана, на материковом склоне северо-восточной части Аравийского полуострова, на шельфе Андаманских островов, на атоллах Космоledo и у северо-западного побережья Австралии [3, 8, 11, 30, 43].

Как видим, в пределах периферических зон океанов, на подводных окраинах континентов фосфориты распространены крайне неравномерно. Наиболее часто они встречаются вдоль восточной и северо-западной периферии Атлантического океана и восточной периферии Тихого океана. Юго-западные части Атлантического и Тихого океанов, а также индийский океан в целом относительно бедны фосфоритами как по числу находок, так и по вероятным ресурсам. В северо-западной части Тихого океана они обнаружены пока только в Японском море и редкие фосфатные желваки — на шельфе Сахалина. Возможно, при более детальном исследовании этой периферии Мирового океана ее фосфатный потенци-

ал возрастет аналогично тому, как это имеет место в северо-западной части Атлантики.

Глубины распространения фосфоритов находятся в основном в пределах от нескольких до 1000 м; значительная глубина обычно связана с вторичным залеганием.

Формы подводного рельефа, на которых залегают фосфориты, разнообразны: пологий широкий внутренний шельф (у берегов Намибии), внешний шельф (северо-западная окраина Африки), континентальный склон и его подножие (у южной оконечности Африки), подводные возвышенности (Калифорнийский бассейн, плато Блейк и Пернамбуко).

Литология фосфоритов также крайне разнообразна: фосфатные зерна, конкреции, разнообразие фосфатизированные органические остатки, фосфатный цемент в конгломератах, брекчиях, глыбах и плитах, в составе которых, в свою очередь, присутствуют фосфатные зерна, конкреции и их фрагменты.

Фосфориты распространены среди терригенных, глауконитовых, карбонатных и кремнистых осадков, но достоверно первичные ассоциации единичны (в связи с переотложением осадочного материала): это фосфоритовые конкреции в диатомовых илах внутреннего шельфа Намибии, в диатомово-терригенных осадках шельфов Перу и Чили и в карбонатных фораминиферовых осадках (обогащенных также органическим веществом) на внешнем шельфе Намибии.

Возраст фосфоритов находится в пределах от современного (голоцен) до эоцен-палеоценового и, возможно, мелового. Наибольшее число датированных находок, включая крупнейшие по ресурсам фосфатного материала, датируется миоценом.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ФОСФОРИТОВ

Несмотря на обилие посвященных фосфоритам работ, данные о их химическом составе немногочисленны. Всего выполнено около 200 полных химических анализов, из которых большая часть относится к фосфоритам банки Агульяс, Калифорнийского бассейна, шельфов Северной Каролины, Перу — Чили и ЮАР. Усредненные данные о химическом составе фосфоритов 22 районов океана приведены в табл. 1.

Изменчивость химического состава фосфоритов соответствует разнообразию их петрографического состава: содержание P_2O_5 в фосфоритах и фосфатизированных породах изменяется в пределах от <10 до $>30\%$, CaO — от 21 до 50% (в наименее загрязненных нефосфатными примесями фосфоритах CaO составляет 46—48%); Mg , связанного главным образом с доломитом — от 0,2 (поднятие Чатам) до 6,37% (шельф Западной Индии).

Минимальное (0,2%) содержание Fe_2O_3 установлено в современных фосфоритах внутреннего шельфа Намибии, залегающих в восстановленных диатомовых илах, максимальное (27,5—30,6%) — в конкрециях с шельфа Австралии и фосфатизированных копролитах с шельфа Гвинеи. Для фосфоритов внутреннего шельфа Намибии характерно также минимальное содержание Al_2O_3 (следы) и SiO_2 (0,17%). Максимальным содержанием Al_2O_3 (7,2%) отличаются фосфориты континентального склона Испании, SiO_2 (21—23%) — фосфориты шельфов ЮАР и Перу — Чили, содержащие значительную примесь терригенного алюмосиликатного и кварцевого материала.

Содержание щелочей колеблется в следующих пределах: K_2O — от 0,05 (внутренний шельф Намибии) до 1,3 (шельф Чили), Na_2O — от 0,17—0,23 (континентальный склон Португалии и шельф Гвинеи) до 2,15% (Японское море). Присутствие K_2O связано с нефосфатным материалом, в то время как значительная часть Na_2O входит в состав фосфатного вещества [6].

Содержание CO_2 в океанских фосфоритах находится в пределах от 3 до 24%. Избыточное его количество (>5 —6%) связано с присутствием кальцита, главным образом остатков раковин планктона и моллюсков.

Регион	Глубина, м	Материал	Число анализов	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
<i>Атлантический океан</i>								
Континентальный склон Испании	200—1000	Конкреции	—	12,87	39,44	1,41	7,54	7,22
То же, Португалии	425—1945	»	13	14,0	43,77	2,62	8,41	1,59
Шельф Марокко	55—290	»	5	20,5	39,4	3,7	11,2	1,5
» Сенегала	20	Фосфатизированный известняк	1	10,0	35,6	4,8	1,3	Следы
» Гвинеи		Фосфатизированные копролиты	1	15,39	16,90	4,92	30,66	5,60
» Анголы	150	Конгломерат	1	21,77	34,27	1,8	4,6	1,9
Внешний шельф Намибии	150—200	Конгломераты, брекчии	4	24,12	42,0	4,6	1,4	0,6
Внутренний шельф Намибии	70—120	Конкреции	6	32,7	46,4	1,7	0,2	Следы
Внешний шельф ЮАР	215—490	Мелкозернистые породы	10	15,60	22,4	2,1	5,3	2,53
Банка Агульяс	100—500	Конкреции, конгломераты	33	18,0	38,33	1,5	5,5	1,9
Шельф Северной Каролины (США)	30—40	Фосфатные пески	27	27,5	45,0	1,0	0,68	0,54
Плато Блейк *	300—600	Конкреции		22,2	50,0	1,2	4,1	1,1
» Пернамбуко	1750—2200	»	10	22,86	42,78	—	11,90	3,36
<i>Тихий океан</i>								
Калифорнийский бассейн	100—350	Конкреции, конгломераты	28	30,0	47,8	0,7	1,0	1,4
Шельф Перу	117—446	Конкреции	14	21,2	34,0	1,5	2,1	4,9
» Чили	100—430	»	10	23,0	33,7	1,2	2,7	4,8
» Сахалина (Охотское море)	150—180	»	2	23,28	35,11	0,87	3,0	1,5
Японское море *	450—1800	»		28,0	43,37	0,94	2,41	1,44
Восточный шельф Австралии	200—300	»	12	9,78	20,9	2,5	27,5	3,38
Поднятие Чатам	285—465	»	12	21,0	42,7	0,2	2,38	0,06
<i>Индийский океан</i>								
Шельф о-ва Сокотра	210	»	2	28,0	43,9	1,1	5,75	2,3
Западный шельф Индии	260—300	Трубчатые образования	2	9,50	25,6	6,37	8,86	4,63

* Объединенные пробы по региону в целом.

** Дополнительная литература приведена в работе [3].

Содержание в фосфоритах общей серы SO₃ колеблется от 0,36—0,40% (шельфы Гвинеи и Чили, плато Блейк) до 3,0—6,7% (шельфы Анголы, ЮАР, Северной Каролины). Раздельное определение форм серы в современных фосфоритах шельфа Намибии, выполненное в лабораториях ГИГХС и ГЕОХИ АН СССР, показало, что содержание окисленных форм (сульфаты) составляют, в них 1,42—1,77%, восстановленных (пирит) — 0,39—0,74%.

Фтор содержится в фосфоритах (за исключением фосфатизированных копролитов) в количестве от 1,34 до 3,4%, при значениях F/P₂O₅ от 0,06 до 0,13; в большинстве случаев величина этого отношения составляет 0,09—0,11. В не полностью литифицированных фосфатизированных копролитах, в составе которых имеются обломки костей и чешуи рыб, содержание фтора и значения F/P₂O₅ минимальны из-за незавершенности перехода гидроксилпатита во фторкарбонатапатит, подобно тому как это наблюдается в костном фосфате [3].

фосфоритов, %

SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CO ₂	SO ₃	F	C	П. п. п.	Литературный источник
<i>Атлантический океан</i>								
15,50	0,77	0,71	—	—	1,33	—	17,57	[35]
5,59	0,43	0,17	—	—	1,8	—	—	[27]
6,8	—	—	13,7	—	1,9	0,5	15,95	[3,16]
1,3	—	—	—	—	—	1,9	27,1	[16]
11,66	1,00	0,23	7,04	0,36	0,84	0,29	2,9	[18]
19,3	—	—	3,65	3,04	2,4	0,76	7,6	[16]
1,4	—	—	—	—	2,5	0,88	12,4	[3,16]
0,17	0,05	1,0	6,3	1,82	3,02	0,92	12,2	[3]
23,34	—	—	7,10	6,76	1,5	0,55	14,2	[16]
10,4	1,3	0,72	11,1	1,5	2,1	0,67	14,8	[16,42]
—	—	—	6,76	3,20	3,14	0,62	—	[45]
3,7	0,3	0,6	11,4	0,38	2,5	0,4	14,9	[36]
7,85	—	—	—	1,32	—	—	—	[39]
<i>Тихий океан</i>								
9,5	0,6	0,8	5,5	2,1	3,4	1,0	9,3	[26]**
22,0	1,1	0,90	3,6	1,1	2,14	0,64	9,2	[3,21]
21,0	1,3	0,85	3,0	0,4	2,20	0,62	8,0	[3,21]
18,76	0,64	1,15	5,81	0,60	1,34	—	5,5	[14]
7,90	0,42	2,15	3,75	1,14	2,97	0,8	7,3	[2]
17,28	1,0	0,57	—	—	2,20	—	15,8	[23,33]
5,3	0,9	0,55	12,2	—	2,25	—	20,8	[24]
<i>Индийский океан</i>								
3,1	0,43	0,9	8,45	—	2,0	0,55	2,0	[8]
11,2	0,55	0,62	24,0	—	1,36	0,64	4,8	[17]

Содержание органического углерода колеблется от 0,4 до 1%; более высокое (1,9%) содержание установлено только в одном образце с шельфа Сенегала.

Для фосфатного вещества фосфоритов характерно повышенное (~8%) по сравнению с континентальными фосфоритами содержание CO₂, а также адсорбированной и структурно связанной воды [6]. По данным Лука и др. [35], формула фосфата кальция океанского фосфорита (материал с континентального склона Испании) имеет вид: $\text{Ca}_{9,71}^{2+}(\text{PO}_4^{3-})_{4,97} \cdot (\text{CO}_3^{2-})_{1,36} \text{F}_{2,2}^-$.

ГЕНЕЗИС ФОСФОРИТОВ

Генезис современных и позднечетвертичных фосфоритов шельфов Намибии, Чили и Перу был установлен с помощью прямых натурных наблюдений, включая весь комплекс условий и процессов их формирования.

ния [3]. Образование этих фосфоритов связано с прибрежным апвеллингом, поступлением растворенного минерального фосфора в фотическую зону, его биоассимиляцией, биоседimentацией, диагенетическим перераспределением в осадках, формированием фосфатных стяжений и их последующей концентрацией в результате литодинамических процессов.

В отличие от гипотезы А. В. Казакова [10], предложившего простую модель: подъем вод — фосфоритообразование, прибрежный апвеллинг не связан с глубинными водами, а накопление фосфора на дне не связано с его хемогенным осаждением из водной толщи. Реальный процесс оказался сложнее и более соответствует (за исключением начального этапа) представлениям, которые развивали сторонники биолитной и биохимической гипотез [7, 40 и др.].

Сходство строения, состава и условий залегания дочетвертичных и «молодых» фосфоритов на шельфах океанов свидетельствует в пользу единообразия их генезиса, хотя ряд сторон процессов формирования древних фосфоритов остается невыясненным.

Одна из сложностей заключалась в том, что современные активные апвеллинги и связанные с ними молодые фосфориты локализованы вдоль восточной периферии Атлантического и Тихого океанов, в то время как вдоль северо-западной периферии Атлантического океана, где апвеллинга нет, широко распространены миоценовые фосфориты. Однако недавно с помощью детальных палеоокеанологических реконструкций было установлено, что в миоцене здесь действовал мощный прибрежный апвеллинг, связанный с палео-Гольфстримом, который вплотную приближался к береговой зоне [44]. Аналогичный прибрежный апвеллинг существовал в миоценовом палео-Японском море, где также образовались значительные залежи фосфоритов на шельфах, погрузившихся в плиоцене — плейстоцене на значительную глубину [4, 5].

Единичные находки голоценовых фосфоритов на восточном шельфе Австралии, где существует лишь спорадический апвеллинг, породили мнение о наличии специфической разновидности «неапвеллинговых» фосфоритов [41]. Действительно, локальная диагенетическая фосфатизация — типичное явление для осадков периферических зон океана с относительно повышенной биологической продуктивностью вод вне зависимости от причин этой продуктивности. Но такая фосфатизация не имеет ничего общего с массивированным накоплением фосфатного материала, необходимого для формирования месторождения. Для такого накопления необходим мощный и долговременный источник поставки фосфора, каким и является прибрежный апвеллинг, многократно превосходящий по абсолютной массе приносимого фосфора любой другой источник, включая речной сток [3]. В справедливости этого суждения убеждает и приведенная выше карта фосфоритоносности окраин океана: крупнейшим апвеллингам (Бенгельскому, Канарскому, Перуанскому, Кальфорнийскому, палео-Каролинскому) соответствуют крупнейшие залежи фосфоритов на дне, слабым апвеллингам — убогая фосфатизация и единичные находки фосфоритов.

Естественно, что различия в морфологии, литологии и условиях залегания фосфоритов, а также различные подходы к реконструкции палеоокеанологической обстановки порождают противоречивость оценок роли таких факторов фосфоритообразования, как апвеллинг, биологическая продуктивность, хемогенные и диагенетические процессы [12, 20—22, 25, 26, 38, 41].

В связи с этим интересны полученные в последние годы данные по изотопному составу углерода и серы, входящих в состав молекулы фторкарбонатапатита. По мнению ряда авторов [38], на основании этих данных можно выделить фосфориты, сформировавшиеся при хемогенно-диагенетических процессах в восстановительной, субокислительной и окислительной обстановке. К первой группе отнесены современные фосфориты шельфа Намибии, ко второй — третичные фосфориты шельфа Марокко, к третьей — позднечетвертичные фосфориты шельфа Перу, миоценовые фосфориты шельфа ЮАР, банки Агульяс, плато Блейк и др.

Однако такая градация не согласуется с фактом наличия восстановительной обстановки в фосфатоносных осадках и фосфоритах континентальной окраины Перу и признаками восстановительной обстановки во многих более древних фосфоритах (наличие пирита, восстановленных форм урана, остатков органического вещества) [3, 21 и др.]. Согласно упомянутой работе [38], изотопный состав серы в фосфоритах одного типа из одного и того же района колеблется в столь широких пределах, что не может служить признаком окислительно-восстановительных условий фосфоритообразования. Что же касается изотопного состава углерода фосфоритов, то он, при наличии на дне известковых осадков, полностью контролируется изотопным составом углерода карбонатов, что связано с метасоматической фосфатизацией известняков, но не является прямым доказательством окислительной обстановки этого процесса.

КАЧЕСТВО И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ФОСФОРИТОВ

Перспективы освоения океанских фосфоритов зависят от их качества, запасов, условий залегания и общей экономической ситуации. По результатам испытаний, проведенных южноафриканской компанией «Фертилайзер девелопмент корпорейшн», фосфориты банки Агульяс легко обогащаются с доведением концентрации P_2O_5 до 16%; приготовленная из этого концентрата фосфоритная мука эквивалентна по усвояемости фосфора коммерческому суперфосфату [46]. Аналогичные результаты были получены при агрохимических испытаниях фосфоритов подводного поднятия Чатам [24], а также ряда других районов океана (Калифорнийский бассейн, шельф Северной Каролины и т. д.).

Исследования, выполненные НПО «Минудобрения», показали, что фосфориты со дна Японского моря пригодны для производства высококачественной фосфоритной муки, а также простого и двойного суперфосфата, аммофоса, фосфорной кислоты, обесфторенных кормовых фосфатов [2, 4].

Ресурсы фосфоритов на шельфах океана были первоначально оценены, на основе умозрительных предпосылок, в 300 млрд. т., т. е. больше, чем на континентах [13]. По современным данным, эту цифру следует, видимо, уменьшить примерно на порядок (табл. 2), но на сегодняшний день информация о запасах фосфоритов на дне океана по-прежнему остается лишь предварительной. Характерно, что максимальные ресурсы фосфоритов выявлены именно в том регионе (шельф Северной Каролины), где проведена детальная разведка. Во многих других перспективных регионах такая разведка не проводилась. Любопытно также, что фосфориты Японского и Охотского морей [5, 12, 14] были впервые обнаружены при ревизии собранного ранее коллекционного материала, который стали опробовать после установления связи фосфоритов с зонами высокой биологической продуктивности и биогенного кремненакопления [3].

Условия залегания фосфоритов в целом благоприятны для их освоения благодаря близости к берегам и относительно небольшой глубине, а также легкой обогатимости фосфатных песков и конкреций на рыхлых осадках [1]. Технические сложности подводной разработки фосфоритов вполне преодолимы, поскольку современная морская технология обеспечивает решение гораздо более трудной проблемы — добычи со дна открытого океана железомарганцевых конкреций, залегающих на глубинах порядка 5000 м.

Таким образом, часть вопросов, связанных с освоением океанских фосфоритов, практически изучена, и решение этой проблемы в отношении конкретных залежей будет, видимо, определяться соотношением цен на фосфатное сырье и себестоимостью добычи [1]. Наиболее перспективными в плане ближайшего практического освоения представляются фосфориты подводного поднятия Чагам и шельфа Северной Каролины. Разработка первых подготавливается с целью обеспечить незави-

ments from the Agulhas Bank, South Africa//Trans. Geol. Soc. S. Africa. 1973. V. 76. P. 271—277.

47. *Summerhayes C. P., Nutter A. H., Tooms J. S.* The distribution and origin of phosphate in sediments off Northwest Africa//Sediment. Geol. 1972. V. 8. № 1. P. 3—28.
48. *Summerhayes C. P., Birch C., Rogers J., Dingle R. V.* Phosphate in sediments off South-Western Africa//Nature. 1973. V. 343. № 5409. P. 509—511.
49. *Summerhayes C. P., Milliman J. D., Briggs S. R. e. a.* North-West Africa shelf sediments: influence of climate and sedimentary processes//J. Geol. 1976. V. 84. № 3. P. 277—300.
50. *Woolsey J. R., Barger D. L.* Exploration for phosphorite in the offshore territories of the People's republic of the Congo, West Africa//Marine Mining. 1986. V. 5. № 3. P. 217—237.

Институт океанологии АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
1.XII.1986