

## ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕЛИ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ КРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АФАНИТОВЫХ ФОСФОРИТОВ ОКИНО-ХУБСУГУЛЬСКОГО БАССЕЙНА И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ

А.Ф. Георгиевский

Инженерный факультет  
Российский университет дружбы народов  
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115923

Для разработки методики поисков месторождений Окино-Хубсугульского бассейна выделены и охарактеризованы основные условия фосфоритообразования, отражающие комплекс обстановок, из которых складывается своеобразная модель формирования крупных месторождений. Рассмотрены факторы, влияющие на обогатимость фосфоритов, и предложен новый высокоэффективный, экологически чистый микробиологический метод их обогащения.

**Ключевые слова:** модель фосфоритообразования, Окино-Хубсугульский бассейн, обогатимость, биогеотехнология.

Разработка модели для крупных (более 50 млн т  $P_2O_5$ ) залежей высококачественных (28%  $P_2O_5$ ) фосфоритов заключается в выяснении специфических геологических условий (палеофациальных, палеотектонических, палеогеографических и др.), оказывающих влияние на развитие благоприятной обстановки для достаточно интенсивного фосфатонакопления, способного образовать мощную фосфоритовую толщу (формацию), продуктивные пачки и пласты.

Модельный подход к раскрытию условий формирования крупных залежей фосфоритов в настоящее время осуществлен для миоценового бассейна Флориды [9] и частично для нижнекембрийского каратауского бассейна в Казахстане [6]. В связи с эволюционным характером развития процесса фосфоритообразования [8], глобального распространения фосфоритонесных толщ и приуроченности их к различным геотектоническим структурам земной коры отмеченные выше модели, по всей видимости, не могут быть универсальными. Логичнее ожидать существование многих моделей, которые при сходстве основного «каркаса» существенно отличаются в деталях строения самих модельных «конструкций». Это обстоятельство приобретает принципиальное значение при изучении перспективных новых территорий.

В модели должны быть отражены:

- литолого-стратиграфический разрез и закономерности размещения в нем фосфоритных толщ, пачек и пластов;
- фациальные обстановки накопления фосфоритов и вмещающих их отложений (гидродинамические условия; соленость вод, их биопродуктивность, газовый и температурный режимы; поступление осадочного материала, его характер и скорость накопления; особенности рельефа морского дна);

— тектоническое строение палеобассейна и роль конседиментационных движений в формировании и локализации фосфоритовых залежей;

— основные палеогеографические параметры обстановки времени фосфоритообразования (положение древней береговой линии; конфигурация морского бассейна; источники сноса терригенного материала и пути его транспортировки; особенности палеоклимата);

— литологические типы фосфоритов и их особенности;

— роль диагенетических и более поздних вторичных процессов в формировании фосфоритов и вмещающих пород;

— геохимические показатели фосфоритов, их пластов, пачек, толщ;

— источник фосфора, механизм его накопления и условия сохранения;

— пострудная тектоника, обусловившая современную структуру месторождений и всего бассейна;

— влияние на качество и обогатимость фосфоритов вторичных процессов;

— возможные и наиболее перспективные технологии обогащения руд.

Фосфоритообразование в истории Земли было широко развито, поскольку фосфориты встречаются в отложениях от докембрийских до современных. Вместе с тем появление крупных месторождений высококачественных фосфоритов — явление довольно редкое и подчиняется стратиграфической приуроченности. Причина этого — создание в определенный отрезок времени благоприятной для фосфатонакопления палеогеографической и тектонической обстановки, а также изменения в составе морской воды и эвстатические колебания уровня моря.

На Сибирско-Азиатском континенте наибольшее развитие получило древнее фосфоритообразование в венде и нижнем кембрии, объединяемых в новейших стратиграфических работах в эдиакарскую систему [11]. Типичным примером эдиакарского фосфатонакопления является Окино-Хубсугульский бассейн (ОХБ), где положение в вертикальном разрезе фосфоритоносной формации соответствует так называемой главной последовательности отложений, выявленной Э.А. Егановым для подавляющего числа фосфоритовых месторождений [6].

В пределах ОХБ месторождения фосфоритов связаны с кремнисто-карбонатной формацией и приурочены к забитской (хэссенской) свите. Характерной чертой ее строения является цикличная структура, которая проявляется на фоне крупного трансгрессивно-регрессивного мегацикла, представленного внизу и вверху терригенно-вулканогенными и терригенными комплексами, а в середине — карбонатными толщами. Забитская свита принадлежит к трансгрессивному плечу мегацикла и локализуется между наиболее мелководными сархойскими вулканогенно-терригенными образованиями и наиболее глубоководными хужиртайскими известняками. Нижняя граница несет следы размыва и начинается базальными конгломератами. Верхняя граница менее четкая.

С тектонических позиций ОХБ является частью Тувино-Монгольского массива, который, по последним данным, рассматривается как «осколок» древнего субмегаконтинента Родиния, распавшегося около 750 млн лет назад [7]. В современной тектонической структуре массив принадлежит Урало-Монгольскому складчатому поясу, испытавшему воздействие нескольких тектонических эпох,

в результате чего было создано сложное складчато-глыбовое сооружение. В пределах палеомассива ОХБ занимал область внутреннего шельфа и развивался в режиме мегасинклинария, консолидация которого завершилась в каледонский этап тектогенеза [1]. На Харанурском месторождении выявлены конседиментационные разрывные нарушения, что свидетельствует о формировании фосфоритов на фоне дифференцированных тектонических движений. Сложный их характер обусловил разнообразные фациальные условия фосфатонакопления, а также основные особенности палеогеографических обстановок седиментационного бассейна.

Фосфориты месторождений ОХБ представлены несколькими генетическими группами и разнообразны по качеству, минеральному составу и структурно-текстурным особенностям. Ведущей группой являются седиментационно-диагенетические фосфориты.

Фосфориты накапливались на глубине от нуля до первых десятков метров в морском бассейне с нормальным газовым режимом, местами испытывавшем кратковременное слабое опреснение [4]. Отложившееся фосфатное вещество прошло сложную историю преобразования. По данным электронной микроскопии, оно представлено не менее чем пятью последовательно кристаллизующимися минеральными фазами, образующими ряд: гелеобразное вещество — лучистые сферолито- и веероподобные обособления игольчатых кристаллитов — призматические кристаллы, друзовидно заполняющие межсферолитовое пространство — агрегаты короткостолбчатых кристаллов, развивающихся по лучистым образованиям с сохранением и без сохранения реликтовых структур — длиннопризматические кристаллы с закономерно изменяющейся ориентировкой, образовавшиеся под воздействием стресса. Первые две минеральные фазы формировались в диагенезе, остальные — в катагенезе и при метаморфизме. В целом же фосфатное вещество характеризуется как фторапатит с переменным незначительным содержанием  $\text{CO}_2$  в кристаллической решетке. В метаморфизованных фосфоритах в заметном количестве присутствуют тетракальциевый фосфат, а в фосфоритах коры выветривания — железофосфаты.

Фосфориты и другие породы фосфоритных пачек на фоне вмещающих отложений выделяются специфичным комплексом микроэлементов, который включает элементы — примеси, связанные с карбонатной (Sr, Mn), графито-сульфидно-алюмосиликатной (Zn, Pb, Cu, Ni, Ba, Cr, V, Ga, B, Ti, Th, U), железо-гидроокисной (Cu, Ni, Cr, V, Ga) и собственно фосфатной частью этих пород (PЗЭ, As, Sr, Ba, U). Фосфатонакопление сопровождалось повышенным по сравнению с кларками накоплением в осадках As, Sr, Ba, Cr, Mo и в какой-то степени Zn, Cu, Ni, B, причем интенсивное накопление в фосфатных осадках As (К.К. = 100) и Ba (К.К. = 220) являлось наиболее характерной особенностью осадочного процесса во время формирования фосфоритов [4].

Фосфоритоносный бассейн располагался в зоне влажного жаркого гумидного климата. Отличительной особенностью бассейна была высокая скорость осадконакопления (около 2,4 м за 1000 лет) [4], беспокойный тектонический режим, а также резко выраженные вторичные изменения фосфоритоносных отложений. Источником фосфора предположительно служили глубинные магматические эманации, постулавшие в бассейн по конседиментационным тектоническим нарушениям.

Обогащаемость фосфатных руд во многом определялась постседиментационными процессами преобразования фосфоритов, изменявшими их минеральный состав, структуры и текстуры. Руды месторождений ОХБ в основном относятся к труднообогащаемым, и при их отработке потребуются привлечение сложных комбинированных технологических схем, включающих суспензионные, флотационные и обжиговые способы извлечения фосфата. Полученные концентраты пригодны для кислотной переработки, но качество их невысокое, и это заметно ухудшает экономические показатели месторождений. Данная проблема в разной степени характерна для большинства фосфоритоносных бассейнов, в конечном итоге это определяет конкурентоспособность фосфатных концентратов на мировом рынке. Опыт показывает, что решение данной проблемы может быть достигнуто при разумном сочетании возможностей традиционных способов обогащения и принципиально новых технологических разработок. К последним относится биотехнологический метод обогащения фосфатного сырья, позволяющий использовать бедные руды, отвалы, а также хвосты обогатительных фабрик, которые традиционными способами не обогащаются [5; 3]. Он отвечает современным требованиям экологической безопасности, так как базируется на принципах замкнутого водооборота с регенерацией рабочих растворов. В рамках метода наметились несколько самостоятельных биотехнологических направлений. Некоторые из них достаточно хорошо апробированы и защищены патентами, другие требуют проведения дальнейших углубленных исследований.

*Биофлотация* основана на способности некоторых микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности (культуральных жидкостей) избирательно влиять на флотационные свойства отдельных минералов, что резко повышает селективность их извлечения. *Биосорбция* позволяет очищать фосфатные продукты от экологически опасных микроэлементов, которые извлекаются при биологической обработке фосфоритов и сорбционно поглощаются на биофильтрах при регенерации оборотных растворов. Применение этого метода при обогащении зернистых фосфоритов Узбекистана и Израиля позволило производить очистку концентратов от токсичных микропримесей U и Cd на 15 и 35% соответственно. В основе *био-конверсионного направления* лежит явление структурной перестройки фосфата, возникающее при воздействии на него культуральными жидкостями в условиях жестких режимов. В результате достигается частичное извлечение из кристаллической решетки фосфата изоморфной примеси  $\text{CO}_2$ , что влечет за собой повышение качества концентратов. При *биоактивации* в фосфоритах увеличивается количество растворимой в лимонной кислоте  $\text{P}_2\text{O}_5$  с 26% до 35% с пропорциональным возрастанием доли фосфатного вещества, способного непосредственно усваиваться растениями.

*Биохимическое направление* наиболее проработано. По этой технологии обогащение достигается селективным выщелачиванием из фосфатного сырья примесных полезных либо вредных компонентов. Из кремнистых фосфоритов Полярного Урала, содержащих 4—7%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , биовыщелачиванием с последующей аккумуляцией в форме преципитата извлекалось до 72% фторапатита. При обогащении карбонатных фосфоритов разных месторождений (в том числе Окино-Хубсугульского бассейна) извлечено 100% кальцита и до 95% доломита [5]. По ка-

честву и потребительским свойствам биоконцентраты фосфатов превосходят аналогичные продукты, получаемые традиционными технологическими методами. Потери  $P_2O_5$  незначительны — меньше 1% для кальцитовых руд и 5—15% для доломитовых. Расчеты себестоимости свидетельствуют о рентабельности биохимического обогащения [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Беличенко В.Г.* Палеотектоническое районирование палеозойд юго-восточной части Восточного Саяна, Западного Хамар—Дабана и Прихубсугулья // Геология и геофизика. — 1985. — № 5.
- [2] *Бушинский Г.И.* Древние фосфориты Азии и их генезис. — М.: Наука, 1966.
- [3] *Георгиевский А.Ф.* Биотехнология фосфатного сырья // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2000. — № 1.
- [4] *Георгиевский А.Ф.* Условия формирования месторождений северной части Окино-Хубсугульского фосфоритоносного бассейна (Юго-Восточный Саян): Автореф. дисс. ... канд. г-м. наук. — М., 1991.
- [5] *Георгиевский А.Ф., Поташиник Б.А., Магер В.О., Финогенова Т.В., Авакян З.А.* Микробиологическое обогащение фосфоритов — технология XXI века // Горный вестник. Специальный выпуск. — 1996.
- [6] *Еганов Э.А., Светов Ю.И.* Каратау — модель региона фосфатонакопления. — Новосибирск: Наука, 1979.
- [7] *Ильин А.В.* Древние (эдиакарские) фосфориты. — М.: ГЕОС, 2008.
- [8] *Красильникова Н.А.* Фосфориты Сибири — закономерности геологического размещения и перспективы поисков: Дисс. ... докт. г-мн. наук. — 1966.
- [9] *Риггс С.Р.* Фосфоритовая седиментация на Флориде — модель фосфогенной системы. Геология месторождений фосфоритов. — М.: Мир, 1983.
- [10] *Семейкин И.Н., Колесников В.П., Белоголовов В.Ф., Храпаль Ю.И.* Геологическое строение и типы руд северной части Ухагольского месторождения (Восточный Саян) // Геология и геофизика. — 1976. — № 9.
- [11] *Knoll A., Walter M., Narbonne G., Christie-Blick N.* Three «Best Places» for Ediacaran period. — Episodes. — 2004. — V. 27. — P. 222.

## THE ESSENTIAL IN A MODEL OF FORMATION CONDITIONS OF APHANITIC PHOSPHATE'S MAJOR DEPOSITS IN KHUBSUGUL BASIN AND THE NEWEST TECHNICS OF THEIR BENEFICATION

**A.F. Georgievsky**

Engineering Faculty

People's Friendship University of Russia

*Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419*

In order to find out a prospecting technique of Khubsugul basin, general conditions of phosphate formation are marked and described. They exhibit a complex of sedimentary environments, making some kind of major deposits' formation model. Factors affecting a phosphate concentrating are examined. A new high — efficiency and ecologically harmless microbiological beneficiating method is proposed for consideration.

**Key words:** phosphate formation's model, Khubsugul basin, beneficiation, biogeotechnology.