

УДК: 551.35+551.8+552.30+553.31+553.64+553.98
/ DOI: 10.31343/1029-7812-2024-18-1-17-23

Л.Л. Демина

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
E-mail: l_demina@mail.ru

УЧЕНИЕ АКАДЕМИКА А.П. ЛИСИЦЫНА О ГЛОБАЛЬНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ И РАЗВИТИЕ БИОГЕОХИМИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОКЕАНЕ

АННОТАЦИЯ

Академик Александр Петрович Лисицын разработал учение о биогенной седиментации и глобальных биофильтрах в Мировом океане, ставшее важной частью морской геологии и геохимии. Будучи последователем академика В.И. Вернадского, А.П. Лисицын выявил принципиальную роль живого и косного вещества в формировании основной части донных осадков океана. В данной работе приведены некоторые данные по биогеохимии микроэлементов в океане, сделана количественная оценка их биоаккумуляция в глобальных биофильтрах.

Ключевые слова: академик А.П. Лисицын, океан, морская геология, биоседиментация.

ABSTRACT

Academician Alexander P. Lisitsyn has developed a theory of biogenic sedimentation and global biofilters in the ocean that became an important part of marine geology and geochemistry. As a follower of Academician Vladimir I. Vernadsky, A.P. Lisitsyn revealed a fundamental role of living matter in formation of the major part of the ocean bottom sediments. This paper presents some data on the trace metal biogeochemistry in the ocean, their bioaccumulation in the global ocean biofilters is quantitatively evaluated.

Keywords: Academician Alexander Lisitsyn, ocean, marine geology, biosedimentation.

ВВЕДЕНИЕ

Около 100 лет назад великий русский ученый Владимир Иванович Вернадский разработал учение о биосфере, пределы которой обусловлены существованием живого вещества, и создал новую науку Биогеохимию. В.И. Вернадский писал о

«всюдности» жизни и считал, что нет природного тела, которое смогло бы сравниться с водой по влиянию на ход основных геологических процессов (Вернадский, 1923, 1926).

В 1960–70 годы в нашей стране были совершены прорывы во многих отраслях знания, в том числе и в науке об океане. В результате крупномасштабных исследований, проводившихся на вновь построенных и хорошо оснащенных научных судах в различных частях Мирового океана, ученые Института океанологии им. П.П. Ширшова (ИО) РАН (АН СССР) получили огромный массив новых экспедиционных данных, обработка которых позволила сделать несколько научных открытий в области океанологии, морской геологии и биологии (см. сайт Института океанологии им. П.П. Ширшова: www.ocean.ru).

Этот период впоследствии был назван «золотым веком» океанологии. На основе системного обобщения огромного массива фактических данных по составу и количественному распределению взвеси и донных осадков в океане А.П. Лисицын развил учение В.И. Вернадского, показав, что в океане значительная часть донных осадков образовалась под прямым или косвенным воздействием живого вещества.

В середине 1970-ых годов возникла острая научная дискуссия между академиком Н.М. Страховым и членом-корреспондентом АН СССР А.П. Лисицыным. Н.М. Страхов писал, что в образовании океанских осадков абсолютно преобладающая роль принадлежит процессам механического разноса осадочного материала, поставляемого в океан речным стоком, на фоне пренебрежимо малого участия биоты в седиментогенезе. Александр Петрович Лисицын обосновал новую парадигму: осадконакопление в океане в значительной степени определяется масштабами биоседиментации. В двух фундаментальных монографиях – «Осадкообразование в океане» (1974) и «Процессы океанской седиментации» (1978) он доказал, что закономерности осадконакопления в Мировом океане подчиняются трем видам зональности: климатической (широтной), циркумконтинентальной (степень близости к континентам) и тектонической. Эти книги стали фундаментом морской седиментологии, отвечающей на вопросы, как происходит формирование донных осадков, какие процессы контролируют пространственно-временную изменчивость их гранулометрического, химического и минерального состава. Впоследствии второе, переработанное и дополнен-

ное англоязычное издание книги, изданной в 1978 г., было опубликовано в Американском Геофизическом Союзе (American Geophysical Union). Вот выдержка из Предисловия профессора Джеймса Кеннета (J.P. Kennet), главного редактора монографии А.П. Лисицына (Lisitsyn, 1996). «Более чем за 20 лет исследований в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН под руководством А.П. Лисицына на основе внушительного объема фактического материала были изучены процессы транспорта и осаждения, построено множество разнообразных карт распределения, состава, баланса масс донных осадков океана. Анализ этих карт позволил А.П. Лисицыну сделать уникальный синтез данных такого масштаба, которого не было ни в одном западном институте. Эта книга – классическая работа, аналог которой вряд ли появится в ближайшее время».

В начале 1980–ых годов А.П. Лисицын и М.Е. Виноградов опубликовали концепцию «живого океана», согласно которой биопродуцирование фито- и зоопланктона является принципиальным процессом в седиментогенезе (Виноградов, Лисицын, 1981; Лисицын, Виноградов, 1982). Между интенсивностью потоков осадочного вещества и величиной первичной продукции органического углерода была установлена прямая зависимость на основе нового в то время количественного метода седиментационных ловушек (Collier, Dumond, 1977). Количественная модель осадконакопления, которая определяет скорости и распределение биогенной триады – Corg , SiO_2

и CaCO_3 была разработана на основе данных по биологической продуктивности в Тихом океане (Богданов и др., 1981).

В данной работе рассмотрены некоторые аспекты учения А.П. Лисицына на примере биогеохимии микроэлементов в океане.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Согласно учению А.П. Лисицына о биодифференциации в океане, осадочный материал, поступивший из разных источников (с речным стоком, из атмосферы, эндогенного и космогенного генезиса), трансформируется под прямым или косвенным воздействием живого вещества (Лисицын, 1983, 1986, 1994, 2001, 2008, 2014, 2017). Биодифференциация производится сообществами разнообразных организмов в системе биологических фильтров, где осуществляется трансформация и транспорт осадочного материала на дно океана. В работах Александра Петровича Лисицына термин «биологический фильтр», первоначально применявшийся для оценки активности зоопланктона и фильтрующих групп бентоса (Богоров, 1965; Зенкевич и др., 1971), получил новое содержание. Оценивая седиментационную активность морской биоты, А.П. Лисицын рассматривал не только зоопланктонные и бентосные организмы-фильтраторы, но и те, которые функционируют на основе био- и хемосинтеза. Морские организмы формируют в вертикальном разрезе океана трехступенчатую систему биофильтров (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема взаимодействия биогеохимических и физических процессов в трех глобальных биофильтрах океана: 1 – первичное продуцирование фитопланктона; 2 – вторичное продуцирование зоопланктона; 3 – функционирование бентосных организмов.

В зоне фотосинтеза (до глубин 100–150 м) функционирует Глобальный биофильтр–1, который служит, по определению А.П. Лисицына, «солнечной батареей» или энергетической основой биогеохимических процессов; здесь создается первичная продукция фитопланктона, сопровождаемая переводом растворенных элементов во взвесь. В глобальном биофильтре–2 (глубины от 100–150 м до 500–600 м) происходит вторичное продуцирование зоопланктона, в результате чего формируются вертикальные потоки биогенных частиц в направлении дна морского бассейна. В глобальном биофильтре–3 бентосные организмы производят биотурбацию и трансформацию состава поверхностного слоя донных осадков (Лисицын, 1983, 1986, 2001, 2004, 2008, 2014).

Осенью 1993 г. А.П. Лисицын возглавил первую комплексную арктическую экспедицию Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН на разрезах от устьевых зон великих рек Сибири – Оби и Енисея до центральной части Карского моря. В течение двух месяцев рука об руку работали специалисты разных направлений: физики, геологи, биологи, химики. Через полгода А.П. Лисицын опубликовал знаменитую статью «Маргинальный фильтр океана», где в виде обобщенной модели была показана этапность трансформации осадочного материала, поставляемого в океан речным стоком (Лисицын, 1994). В трех главных зонах маргинального фильтра (физической, физико-химической и биологической) материал речного стока подвергается кардинальной переработке, при этом более 90% взвешенного материала речного стока осажается на начальных стадиях смешения речных и морских вод в результате гравитационного и физико-химического осаждения главной массы (более 90%) речной взвеси. Преобразование материала речного стока продолжается в пределах маргинального биофильтра, представленного сообществами фито- и зоопланктона, а также бентосными организмами.

Биологические фильтры работают в различных районах океана: на шельфе, в продуктивной зоне и пелагиали океана, включая биологические сообщества глубоководных гидротермальных систем. Эти биофильтры различаются между собой по абиотическим параметрам и по структуре биологических сообществ (Лисицын, 2001, 2004, 2008, 2009, 2014, 2017).

Известно, что живое вещество на 99.9% состоит из 12 химических макроэлементов: Н, С, N, О, Р, Al, S, Na, K, Ca, Mg, Cl, и лишь на оставшиеся 0.1% в сумме приходится около 100 микроэлементов с содержанием от 10^{-3} до $10^{-12}\%$. Почему важно

изучать микроэлементы и тяжелые металлы в организмах? Большинство тяжелых металлов – Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Mo и др., так называемые эссенциальные, являются ключевыми элементами в химической структуре металлоэнзимов и кофакторов и активно участвуют в процессах фотосинтеза, окисления-восстановления, углеводного обмена, дыхания, гидролиза и др. Вследствие этого организмы всех уровней организации активно ассимилируют тяжелые металлы. Однако при превышении определенных концентраций (предельно допустимых, регламентируемых для морепродуктов) тяжелые металлы и металлоиды (As, Sb, Se) становятся токсичными для организмов. Тяжелые металлы Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb относятся к группе тяжелых и переходных элементов с недостроенной 3-d электронной оболочкой, которым свойственна высокая химическая активность и способность к образованию стойких металлорганических комплексов.

По нашим оценкам, сообщества фито- и зоопланктона (по сравнению с макрофитами и моллюсками), являются наиболее мощным компонентом маргинального биофильтра, которые концентрируют большую группу микроэлементов (Fe, Mn, Co, Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn и As) в своей биомассе за год – от 0.2×10^6 тонн (As и Cd) до 250×10^6 тонн (Fe) (Демина, Лисицын, 2013).

В юго-восточной части Тихого и центральной части Индийского океанов повышенные концентрации растворенных Fe, Zn, Cu, Ni и Co приурочены к зоне фотосинтеза, причем от 50% (Zn) до 90% (Fe) металлов в фильтрате морской воды связано с органическими лигандами (Демина и др., 1983). С помощью независимых методов было показано, что в различных районах Мирового океана значительная доля биоактивных металлов находится в виде хелатов: Fe, Cd, Co – 90–95%; Cu, Zn – от 50 до 85%; Ag, Ni – от 20 до 50% от общей концентрации каждого из металлов (Coale, Bruland, 1988; Bruland, 1989; Saito, Moffet, 2001; Boyé et al., 2003; Bruland, Lohan, 2004). Для ряда металлов установлен биогенный тип вертикального распределения в океане с минимумом концентрации в поверхностном слое (рис. 2), что обусловлено, как и для биогенных элементов (кремния, азота и фосфора), их ассимиляцией фитопланктоном, т.е. переводом из раствора во взвесь. С глубиной происходит разложение биогенных частиц и высвобождение металлов в воду, при этом концентрация металлов возрастает. Это показывает прямую связь микроэлементов с процессами первичного биопродуцирования и деструкции органического вещества.

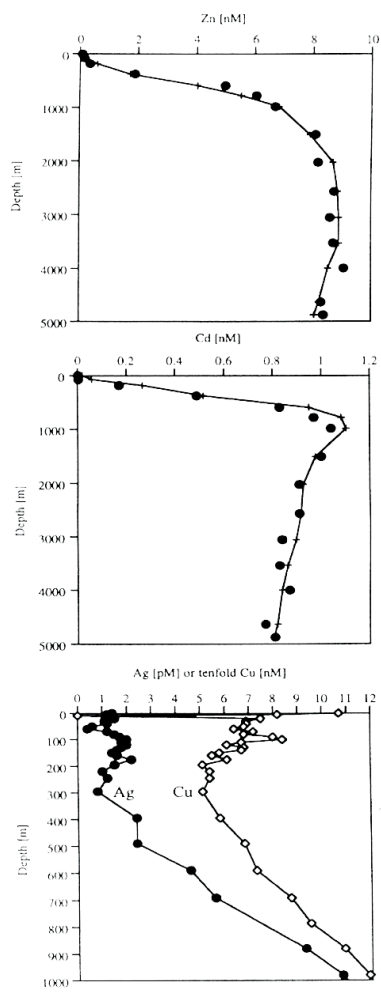


Рис. 2. Вертикальное распределение цинка (а), кадмия (б), серебра и меди (в) в водах Тихого океана (Bruland, Lohan, 2004).

За последние 15 лет была доказана повсеместная способность микроэлементов формировать комплексы с органическими лигандами. В разбавленной океанской водой глубоководных гидротермальных флюидах, обогащенных восстановленными соединениями серы и тяжелыми металлами, экзометаболиты термофильных бактерий и архей способствуют формированию стабильных органических комплексов, константа устойчивости которых выше, чем сульфидных. Это приводит к сохранению железа, марганца, цинка, хрома и меди в растворенной форме и усиливает транспорт металлов на большие расстояния от гидротермальных источников (Bennet et al., 2008; Sander, Koschinsky, 2011). В результате влияние глубоководных гидротермальных источников на глобальный бюджет микроэлементов в океане возрастает.

а)

б)

в)

Количественная оценка поглощения микроэлементов планктоном в эуфотической зоне открытого океана позволила установить, что продолжительность биоцикла $T_{\text{био}}$ каждого из исследованных металлов значительно меньше, чем время τ его пребывания в океане (Демина, Лисицын 2013). Продолжительность биологического цикла $T_{\text{био}}$ варьирует в пределах от <0.1 года (Fe) до примерно трех лет (Zn), тогда как время пребывания в океане τ – от одного года (Fe, Mn) до более 1000 лет (Cd) (рис. 3). Для группы металлов отмечается следующая тенденция: прямая зависимость между $T_{\text{био}}$ и τ металлов в океане, но продолжительность биологического цикла $T_{\text{био}}$ металлов от пяти до ста раз меньше, чем τ .

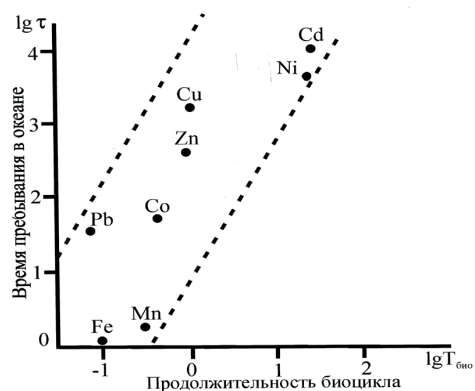


Рис. 3. Зависимость между временем пребывания (τ , годы) металлов и продолжительностью их биологического цикла ($T_{\text{био}}$, годы) в океане (Демина, Лисицын, 2013).

Наименьшие значения $T_{\text{био}}$ и τ для Mn и Fe (рис. 3), ключевых элементов фотосинтетических и окислительно-восстановительных процессов, свидетельствуют об их самом быстром биологическом круговороте в океане. Биогеохимическим следствием сравнения $T_{\text{био}}$ и τ является то, что поглощение металлов и высокая интенсивность биологических циклов фито- и зоопланктона способствуют многократному ускорению миграции металлов в океане.

Для сравнения интенсивности накопления биотой в разных районах океана и исходя из одного из главных свойств организмов – воспроизводство биомассы, было предложено использовать термин «биоаккумуляционный потенциал» (Демина, Лисицын, 2013). При этом оценивается концентрация того или иного элемента (мкг/г сухого вещества) не в отдельных тканях организма, а его интегральное содержание в целом теле таксона, умноженное на его биомассу на единице площади

биотопа ($\text{мг}/\text{м}^2$). Такой подход позволил нам впервые сделать сравнительную оценку биоаккумуляционного потенциала (БП) сообществ, обитающих в геохимически различных областях океана: для маргинального фильтра, для эуфотической зоны пелагиали океана и для глубоководных гидротермальных полей, где организмы существуют в основном за счет органики, созданной в процессе хемосинтеза. Установлено, что донная фауна глубоководных высокотемпературных

гидротерм Срединно-Атлантического хребта (САХ) характеризуется максимальными значениями БП (Демина, Лисицын, 2013; Демина, Галкин, 2013). Это позволило нам считать гидротермальную фауну высокотемпературных гидротерм САХ новым глобальным биофильтром, где биоаккумуляция микроэлементов в расчете на биомассу на единицу площади биотопа в 100–1000 раз больше, чем в маргинальном фильтре и эуфотической зоне океана (рис. 4).

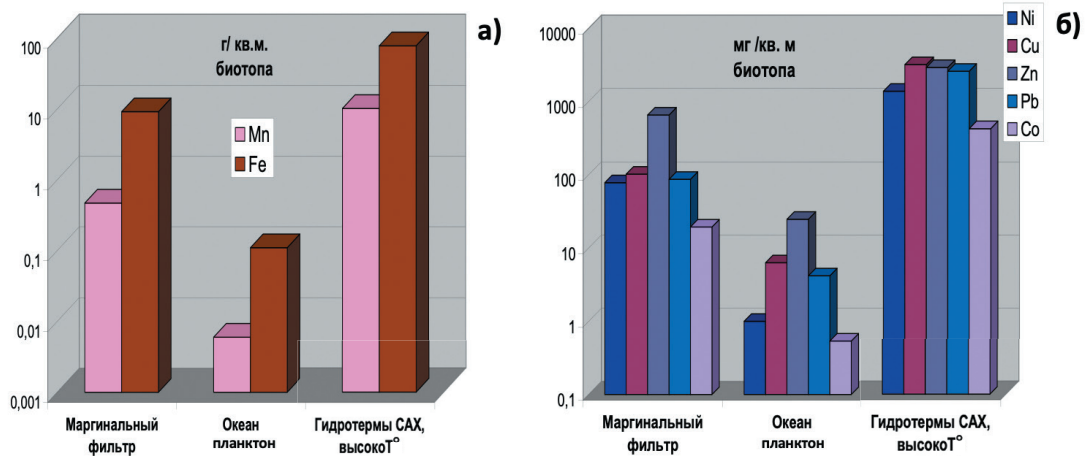


Рис. 4. Сравнение биоаккумуляционного потенциала микроэлементов в трех зонах океана: маргинальной, эуфотической и зоне высокотемпературных гидротерм Срединно-Атлантического хребта (САХ). а) Fe и Mn ($\text{г}/\text{кв.м}$ биотопа), б) Ni, Cu, Zn, Pb и Co ($\text{мг}/\text{кв.м}$ биотопа).

На рубеже XX–XXI веков океанологи начали фиксировать изменения в глобальной океанической циркуляции, которые особенно ярко проявились в Северном полушарии, и исследователи обратились к Северной Атлантике и Арктическим морям. Государственное финансирование крупных океанских экспедиций в то время резко сократилось, но молодежь продолжала стремиться в Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, в Лабораторию физико-геологических исследований Александра Петровича Лисицына. Альтернативой океанским экспедициям послужила мультидисциплинарная программа «Система Белого моря», разработанная им вместе со своим учеником Владимиром Петровичем Шевченко. Это был адекватный ответ Александра Петровича на вызов времени. Программа реализовывалась на протяжении 15-ти лет, когда регулярно проводились небольшие по длительности (в среднем 2 недели) комплексные экспедиции в Белом море. В этих рейсах, ставших испытательными полигонами, аспиранты и студенты под руководством В.Н. Лукашина и В.П. Шевченко обучались палубным океанологическим и геологическим работам, получали навыки первичной обработки полученного материала. Результаты этих

мультидисциплинарных исследований были опубликованы в четырех томах монографии «Система Белого моря» (2010, 2012, 2013, 2017). В одной из глав первого тома Александр Петрович Лисицын, рассматривая процессы подготовки и отложения осадочного материала, уделил особое внимание концепции живого водосбора на примере субарктического Белого моря. В 2018 г. в издательстве Шпрингер (Springer), Германия, вышел двухтомный перевод этой монографии (Biogeochemistry..., 2018; Sedimentation..., 2018). Во всех этих книгах А.П. Лисицын был основным ответственным редактором.

В 2014 г. был создан Российский научный фонд (РНФ), и А.П. Лисицын возглавил работу по большому гранту в номинации «Лучшая лаборатория/кафедра». Целью поддержанного РНФ проекта было установление закономерностей седиментации в пяти морях России, находящихся в разных климатических зонах. А.П. Лисицын называл этот грант «пятерочка». Одновременно с этим наша Лаборатория начала участвовать в крупном институтском проекте по Мировому океану, также получившем большой грант РНФ. Помню воодушевление и

нескрываемую радость Александра Петровича Лисицына: его Лаборатория вернулась в океан! Начались регулярные экспедиции в Северную Атлантику, Баренцево, Балтийское, Черное и Каспийское моря. Кроме того, обновлялась научно–техническая база. Лаборатория покупала новые аналитические приборы, экспедиционное оборудование, но приоритетом были седиментационные ловушки и оснащение АГОС – автоматизированных глубоководных обсерваторий седиментации. А.П. Лисицын разрабатывал концепцию 4D–Океанологии, т.е. изучение процессов седиментации в четырех измерениях: трех – в пространстве и одного – во времени.

За последнее время мировым научным сообществом были получены важные результаты в области биогеохимии микроэлементов в океане по международной программе «Геотрассеры» (www.geotraces.org). Программа «Геотрассеры» базируется на систематических широкомасштабных экспедиционных исследованиях, проводящихся преимущественно по трансокеанским разрезам с применением высокотехнологичных методов океанологических наблюдений, пробоотбора и анализа. Инициаторами и руководителями этой программы являются ведущие геохимики Роберт Андерсон (R. Anderson) и Эдвард Бойль (E. Boyle). Они с глубоким уважением относились к А.П. Лисицыну, высоко оценивая его работы и будучи лично знакомыми с ним, начиная с 1984 г., когда в г. Москве проходила 27–я сессия Международного Геологического конгресса. В 2012 г. в ИО РАН была проведена первая Российская конференция по Международной программе «Геотрассеры» (Демин, Шаповалов, 2014). Собрались российские и зарубежные исследователи, в том числе пятнадцать ученых из США, Германии, Швеции, Великобритании. Александр Петрович Лисицын, которому тогда было почти 90 лет, сделал прекрасный большой пленарный доклад на английском языке. Он показал нам всем пример настоящего служения науке и восхитил этим всех присутствующих. Александр Петрович оценивал исследования по программе «Геотрассеры», и, как мне кажется, осознавал, что именно он более 50–ти лет назад начинал комплексные исследования на трансокеанских разрезах, и тем самым заложил основы современной седиментологии и биогеохимии океана в глобальном масштабе.

Научные заслуги А.П. Лисицына получили признание как в нашей стране, так и за рубежом: Международная медаль им. Фрэнсиса Шепарда «Excellence in Marine Geology» (за превосходную

работу по морской геологии) в 1968 г., Премия «Триумф–Наука» в 2008 г., Премия Правительства РФ в области науки и техники в 2012 г.

На Ученом совете Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН 3 июля 2018 г. мы отмечали 95–летие Александра Петровича, он выступил с большим докладом, как бы подводя итоги своей научной жизни (при этом делал его стоя). Подарком от Лаборатории был его креативный портрет .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учение академика РАН А.П. Лисицына о биофильтрах в океане получило подтверждение и развитие в работах по биогеохимии микроэлементов как его учеников, так и исследователей международного научного сообщества. Выполнена количественная оценка роли живого вещества в миграции микроэлементов в океане. Геохимическое поведение микроэлементов в водной толще океана отражает распределение биогенных элементов. Вовлечение некоторых тяжелых металлов в биочикл планктона в эуфотической зоне значительно ускоряет их миграцию и круговорот в океане. Биоаккумуляционный потенциал донной фауны, обитающей вблизи высокотемпературных гидротермальных полей Срединно–Атлантического хребта, в отношении группы микроэлементов намного превышает таковой биосообществ маргинального фильтра и планктона эуфотической зоны океана.

Александр Петрович Лисицын, по моему мнению, принадлежал к поколению, у которого были идеалы и устремления. Это было заложено в генетическом коде его дедом – просвещенным крестьянином и отцом – великим селекционером–растениеводом академиком АН СССР Петром Ивановичем Лисицыным. А.П. Лисицын пронес эти идеалы через всю свою трудную, временами тяжелую, но чрезвычайно интересную и насыщенную жизнь, отдавая себя науке до самого последнего дня. Он показал нам высочайший пример силы духа. А.П. Лисицын был гигантом, и мы, его ученики, стоим на его плечах: «...Мы подобны карликам, усевшимся на плечах великанов; мы видим больше и дальше, чем они, не потому, что обладаем лучшим зрением, и не потому, что выше их, но потому, что они нас подняли и увеличили наш рост собственным величием...» – так богослов Иоанн Сольсберийский процитировал философа и богослова XII в. Бернара Шартрского (Иоанн Сольсберийский, 1972).

ЛИТЕРАТУРА

- Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г., Лисицын А.П. Биогенная дифференциация осадочного материала и вопросы пелагической седиментации в Тихом океане // *Климатическая зональность и осадкообразование* / Отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Наука, 1981. С. 198–218.
- Богоров В.Г. Количественная оценка животного и растительного населения океана // *Доклады АН СССР*. 1965. № 5. С. 162–168.
- Вернадский В.И. Живое вещество в химии моря. Пг.: Научхимтехиздат, 1923. 37 с.
- Вернадский В.И. Биосфера. Ленинград: Научхимтехиздат, науч.-техн. отдел ВСНХ, 1926. 146 с.
- Виноградов М.Е., Лисицын А.П. Глобальные закономерности распределения жизни в океане и их отражение в составе донных осадков. Закономерности распределения планктона и бентоса в океане // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* № 3. 1981. С. 5–28.
- Зенкевич Л.А., Филатова З.Н., Беляев Г.М. и др. Количественное распределение зообентоса в Мировом океане // *Бюлл. МОИП. Отд. биол.* Т. 76. Вып. 3. 1971. С. 28–41.
- Иоанн Сольсберийский // *Памятники средневековой латинской литературы X—XII веков*. М.: Наука, 1972. С. 348–353.
- Демина Л.Л. Формы нахождения металлов в растворе и взвеси – критерии поиска гидротерм // *Геохимия и геология базальтов и осадков рифта Таджур* / Отв. ред. акад. Л.В. Тауссон. М.: Наука, 1989. С. 148–163.
- Демина Л.Л., Гордеев В.В., Шумилин Е.В. Биокосная система океанской воды // *Биогеохимия океана* / Отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Наука, 1983. С. 90–112.
- Демина Л.Л., Галкин С.В. Биогеохимия микроэлементов в глубоководных гидротермальных экосистемах океана. М.: ГЕОС, 2013. 280 с.
- Демина Л.Л., Лисицын А.П. Роль глобальных биологических фильтров в геохимической миграции микроэлементов в океане: сравнительная оценка // *Доклады АН*. Т. 449. № 6. 2013. С. 710–714.
- Демина Л.Л., Шаповалов С.М. Первая российская конференция по международной программе «Геотрассеры» // *Океанология*. Т. 54. 2014. № 1. С. 124–127.
- Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах: Количественное распределение осадочного материала / Отв. ред. П.Л. Безруков. М.: Наука, 1974. 438 с.
- Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации: литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 358 с.
- Лисицын А.П. Основные понятия биогеохимии океана // *Биогеохимия океана* / Отв. ред. А.С. Монин, А.П. Лисицын. М.: Наука, 1983. С. 9–31.
- Лисицын А.П. Биодифференциация вещества в океане и осадочный процесс. // *Биодифференциация осадочного вещества в морях и океанах* / Отв. ред. А.П. Лисицын, Ю.П. Хрусталева. Ростов н/Д: Изд-во Ростов. ун-та. 1986. С. 3–65.
- 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* / Отв. ред. Н.А. Добрецов, В.И. Коваленко. Новосибирск: ГЕО, 2001. С. 163–249.
- Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // *Геология и геофизика*. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
- Лисицын А.П., Виноградов М.Е. Глобальные закономерности распределения жизни в океане и их отражение в составе донных осадков. Образование и распределение биогенных осадков // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* № 4. 1982. С. 5–24.
- Система Белого моря / Отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Научный мир. Т. 1. 2010. 478 с.; Т. 2. 2012. 802 с.; Т. 3. 2013. 690 с.; Т. 4. 2017. 1030 с.
- Bennett S.A., Achterberg E.P., Connelly D.P., Statharn P.J., Fones G.R., German C.R. The distribution and stabilisation of dissolved Fe in deep-sea hydrothermal plumes // *Earth and Planet. Sci. Letters*. Vol. 270 (3–4). 2008. P. 157–167.
- Boye M.B., Aldrich A.P., Van den Berg C.M.G. et al. Horizontal gradient of the chemical speciation of iron in surface water of NE Atlantic Ocean // *Mar. Chem.* Vol. 50. 2003. P. 129–143.
- Bruland K.W. Oceanic zink speciation: complexation of Zn by natural organic ligands in the central North Pacific // *Limnol. Oceanogr.* Vol. 34. 1989. P. 267–283.
- Bruland K.W., Lohan M.C. Controls of trace metals in sea water. The oceans and marine geochemistry // *Treatise on Geochemistry*. Vol. 6. / Eds. H.D. Holland and K.K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 23–47.
- Coale K. H., Bruland K.W. Copper complexation in the northeast Pacific // *Limnol. Oceanogr.* Vol. 33. 1988. P. 1081–1101.
- Collier R., Dymond J. Sediment trap experiment at the Galapagos spreading center. Preliminary results. EOS. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 58. 1977. P. 1172–1198.
- Lisitsyn A.P. Oceanic Sedimentation: Lithology and Geochemistry / Ed. J. Kennet. Washington D.C.: American Geophysical Union, 1996. 400 p.
- Saito M.A., Moffett J.W. Complexation of cobalt by natural organic ligands in the Sargasso Sea as determined by a new high-sensitivity electrochemical cobalt speciation method suitable for open ocean work // *Marine Chemistry*. Vol. 75. 2001. P. 69–88.
- Sander S.G., Koschinsky A. Metal flux from hydrothermal vents increased by organic complexation // *Nature Geoscience*. № 4. 2011. P. 145–150.
- Biogeochemistry of the Atmosphere, Ice and Water of the White Sea: The White Sea Environment Part I (Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 81) / Eds. Alexander P. Lisitsyn, Viacheslav V. Gordeev. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 327 pp.
- Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea Environment Part II (Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 82) / Eds. Alexander P. Lisitsyn, Liudmila L. Demina. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 311 p.