

РЕЦЕНЗИЯ НА КНИГУ
 Г.А. ЛЕОНОВОЙ И В.А. БОБРОВА
 «ГЕОХИМИЧЕСКАЯ РОЛЬ ПЛАНКТОНА
 КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ВОДОЕМОВ СИБИРИ
 В КОНЦЕНТРИРОВАНИИ И БИОСЕДИМЕНТАЦИИ
 МИКРОЭЛЕМЕНТОВ»
 НОВОСИБИРСК: ГЕО, 2012. – 314 С.

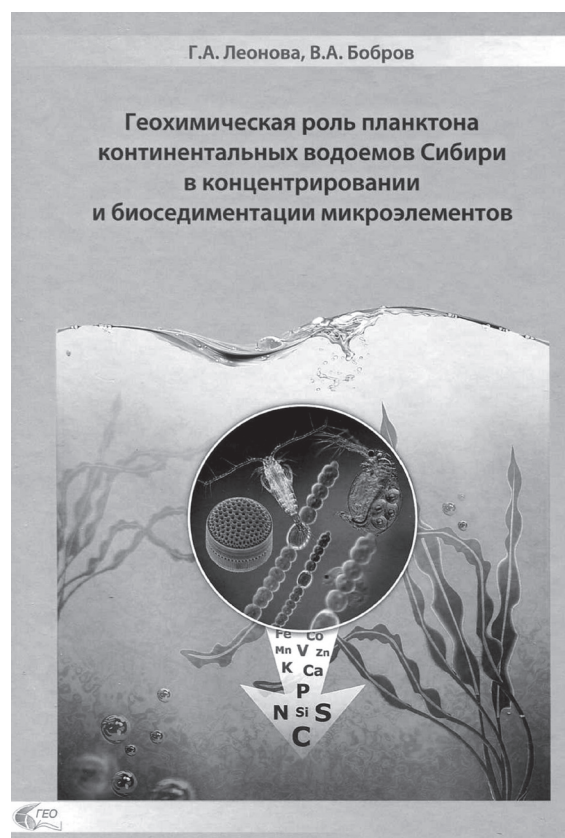
Огромная геохимическая роль «живого вещества» (само это понятие было введено В.И. Вернадским) общеизвестна. Также многое известно о геохимической роли планктона, но, главным образом, морского, служащего базисом пищевых цепей для промысловой морской фауны. В частности, научной школой академика А.П. Лисицына из московского Института океанологии на огромном фактическом материале развита глобальная концепция «живого океана», согласно которой главным агентом осадкообразования («биофильтром») в океане является именно планктон. Об озерном планктоне известно гораздо меньше, а о планктоне континентальных водоемов Сибири (озер и водохранилищ) до последнего времени мы вообще знали очень немногое: добываемая гидробиологами эколого-биологическая информация не была в должной мере дополнена данными изучения вещественного состава планктона с помощью современных аналитических методов.

Поэтому, несмотря на затертость этого стандартного выражения, солидная монография Г.А. Леоновой и В.А. Боброва действительно «восполняет пробел» в познании геохимии озерного планктона Сибири, и публикация данной книги (в значительной мере основанной на защищенной в Институте геологии и минералогии СО РАН докторской диссертации Г.А. Леоновой) – явление весьма отрадное.

Книга состоит из Введения, шести глав и Заключения.

Во **Введении** авторы позиционируют себя как идейные последователи В.И. Вернадского, А.П. Виноградова и А.П. Лисицына, кратко реферируют основные результаты исследования (что было бы лучше сделать только в конце книги, а не в начале) и приводят необходимые стандартные сведения об использованных ими аналитических методах. Список таковых надо признать впечатляющим: ИСП – в модификациях МС и АЭС; ИНАА; РФА СИ; ААС в модификациях ЭТА и ПА, а также – «холодного пара» для определения ртути; традиционный атомно-эмиссионный спектральный анализ; рентгенофлуоресцентная энергодисперсионная спектрометрия под сканирующим электронным микроскопом (РФ ЭДС). Здесь не упомянуты обычные методы химического анализа природных вод – обязательные процедуры при изучении водоемов. Если всё, касающееся опробования планктона. – область ответственности Г.А. Леоновой, то грамотное применение всех аналитических методов (а также разработка алгоритмов интерпретации полученных данных) – заслуга В.А. Боброва – многолетнего сотрудника выдающегося сибирского геохимика В.М. Гавшина.

Глава 1 названа несколько манерно: «Планктон – универсальный представитель живого вещества



гидросферы», ибо непонятно, что значит – универсальный представитель? Например, каким образом планктон «представляет» живое вещество рыб или китов?

Глава имеет обзорный характер; авторы кратко вводят читателей в концепцию живого вещества по В.И. Вернадскому; напоминают о выделенных им *биогеохимических функциях* живого вещества; вслед за А.П. Лисицыным рассматривают планктон как глобальную фильтрующую систему водной среды, в особенности на геохимическом барьере река/море. Анализируются особенности фильтрационной роли планктона в различных водоемах – от океана до рек, водохранилищ и малых бессточных озер.

Несколько раз возвращаясь по ходу изложения к фундаментальной сводке А.П. Виноградова по химическому составу организмов моря [1935], авторы указывают, что аналогичной сводки для планктона континентальных пресных водоемов нет, хотя для многих озер выполнены детальные исследования по отдельным биогенным и техногенным элементам (так называемые сериальные определения).

Выясняется, что поиск публикаций по микроэлементному составу планктона озер северных широт (Канада, Норвегия, Исландия), как во всемирной сети Интернет, так и при личной переписке с зарубежными специалистами, оказался малополезным, из чего следует заключение о слабой изученности химического состава континентального планктона – как в России, так и за рубежом.

В этой главе освещается крайне актуальная экологическая проблема – *использование планктона в качестве биоиндикатора техногенного загрязнения водоемов*. При этом – на основе как своего опыта, так и грамотного обобщения – сделаны три важных вывода.

Во-первых, химический состав планктона лучше индицирует *кратковременное* загрязнение водной среды тяжелыми металлами от локальных источников, в частности – от залповых сбросов сточных вод, нежели долговременные фоновые загрязнения.

Во-вторых, не имеет смысла использовать для биоиндикации *тотальный планктон* ввиду громадных дисперсий концентраций элементов-примесей, вызванных влиянием целого ряда факторов, которые невозможно правильно учесть и оценить. Среди них, в частности, и соотношения биомасс отдельных видов в пробе; и массовых долей фито- и зоопланктона; и сезона отбора планктонной пробы.

В-третьих, планктонная биоиндикация оказывается вполне возможной и достаточно эффективной, если она выполняется по *однородным* («монотонным») пробам планктона, выловленного в сезон массового развития одного (двух) доминирующих видов. Но для этого (как понятно) необходим достаточно высокий профессиональный уровень исследования: нужно хорошо знать стадии биологического развития планктонных организмов, правильно выбрать место и глубину отбора проб, подобрать планктонные сети с определенным размером ячеи фильтрующего конуса.

Глава 2 – методическая, она называется «*Методы биогеохимического исследования водных экосистем*». При биогеохимическом опробовании водных экосистем изучают химический состав основных сопряженных сред – воды, взвеси, донных отложений и биообъектов.

Вследствие низких (следовых) концентраций «микроэлементов» (я не считаю этот термин корректным и предпочитаю термин свободного пользования – *элементы-примеси*) в водах прямое их определение без предварительного концентрирования часто не обеспечивает необходимой точности (особенно в отношении As, Se, Sb, Cd, Hg). А планктон, реализующий «концентрационную функцию» по Вернадскому, накапливая элементы в содержаниях, как минимум, на 1–3 порядка выше фоновых, является идеальным природным концентратором. Поэтому по составу планктона (обычно – озолненного, что увеличивает исходную концентрацию элементов еще в десятки раз) можно более достоверно судить и о составе воды, в которой он обитает.

В ловчие сети попадает либо чистый планктон, либо так называемый *сестон* – смесь планктона и минеральной взвеси. Различать их необходимо, потому что это коренным образом меняет интерпретацию аналитических результатов. Поэтому этой проблеме уделено значительное внимание: с помощью современных микрометодов анализа – сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС) авторами контролировалось отсутствие терригенной примеси в анализируемых планктонных образцах (помимо обычно используемой величины зольности). Применение метода СЭМ позволило авторам корректно решить важный методический вопрос о причинах повышенной зольности некоторых образцов планктона, которая в большинстве проб была обусловлена конституционными химическими элементами скелетных и покровных тканей планктонных организмов. По данным энергодисперсионных спектров химических элементов

было сделано заключение, что планктонные образцы почти не содержат терригенной примеси – в пробах не установлено присутствия индикаторов терригенных компонентов – Al, Zr, Ti и Si_{крист} обломочных минералов. Зольность планктонных образцов в целом обусловлена конституционными элементами, входящими в живое вещество и наружные скелетные панцири планктонных организмов.

В целях количественного сравнения концентрационной функции планктона по разным элементам-примесям широко используется вычисление коэффициентов биологического поглощения, которые авторы обозначают как K_0 (я бы предпочел все-таки обозначение КБП), – отношение содержания элементов в планктоне к содержанию элемента в воде:

$$K_0 = C_{i(\text{планктон})} / C_{i(\text{вода})}$$

где: $C_{i(\text{планктон})}$ – содержание i -го химического элемента в планктоне (мг/кг сырой массы); $C_{i(\text{вода})}$ – содержание i -го химического элемента в воде (мг/л).

Мне кажется, что такое вычисление методически сомнительно, ибо содержание в сыром планктоне (непредсказуемым образом зависящее от влажности пробы!) – величина слишком изменчивая. Поэтому корректное вычисление КБП, как мне представляется, должно производиться только по *сухой пробе* планктона.

Кроме того, авторы широко применяют известный в геохимии методический прием – нормирование содержаний химических элементов по так называемому *элементу-свидетелю*. В качестве элемента-свидетеля терригенной примеси выбран *скандий* – полагают, что этот элемент-гидролизат, близкий аналог редкоземельных элементов (РЗЭ), на все 100% является терригенным. Нормирование позволяет оценить долевые вклады разных генетических фракций элемент-примесей в озерных осадках: биогенной (планктоногенной), терригенной и остаточной (пеллетной + гидрогенной). Например, при зольности исходного планктона 10% и зольности сапропеля 47% расчет дает следующий баланс генетических фракций Са в сапропеле):

терригенный кальций	14%
планктоногенный кальций	58%
пеллетный + гидрогенный кальций	28%

К сожалению, при расчетах терригенного вклада авторы пошли по легкому пути: *вместо оценки реального геохимического фона водосборов, питающих озерные бассейны Сибири терригенным материалом, они взяли глобальные кларки для «сланцев»*, вычисленные американским геохимиком Ж.-Х. Ли (Y.-X. Li) в его знаменитом «Компендиуме» [2000] и в более ранней статье [1991]. Например, кларк Са для «сланцев» в этой статье равен 1,6% (16000 г/т) – эту цифру авторы используют в своих балансовых расчетах (равно как и все другие цифры Ли для «микроэлементов»). Но ведь Сибирь – это далеко не весь мир; не окажется ли оценка местного геохимического фона взвешенного Са, вносимого здесь реками в озеро и водохранилища, существенно иной, чем в среднем «сланце» Ли?

Поскольку среди изученных авторами объектов были и *соленые озера*, читатель-профессионал обра-

тит внимание на важную «компьютерную» новацию, позволившую авторам снять ряд ограничений, существующих при расчете форм химических элементов в высокоминерализованных растворах. Известно, что программа WATERQ4F не предназначена для расчета форм элементов в подобных растворах и не располагает базой термодинамических данных для расчета форм ртути. С другой стороны, адаптированный программный комплекс «Селектор-С» позволяет рассчитывать равновесие в минерализованных растворах, однако встроенные термодинамические базы имеют ограничения по списку форм элементов-примесей. **Совместное применение двух компьютерных программ** не только дало вполне удовлетворительный по степени сходимости с химико-аналитическими данными результат, но и позволило рассчитать формы существования большинства химических элементов в водном растворе разной солености.

Глава 3 называется «*Элементный состав океанического, морского и континентального планктона*» (кстати, кто-нибудь знает, почему в одних случаях говорят «океанический», а в других – «океанский»?).

Данные по океанскому и морскому планктону в основном взяты из литературы (это обзорный раздел 3.1), а по континентальному – получены авторами. Важным достоинством обзора является детальный анализ фундаментальной сводки А.П. Виноградова [1935] «Химический элементарный состав организмов моря», которая еще в военные годы была переведена в США на английский язык.

Тем не менее, в упрек авторам можно поставить неполноту обзора. Указав на обобщающие работы В.С. Савенко [1988] и того же Ж.-Х. Ли [1991], отметив еще несколько важных работ, в том числе Г.Н. Батурина и др. [1993], авторы не сочли нужным упомянуть наше обобщение [статья 1990 г. и книга 1994 г.¹, с. 11], где нами независимо (по своей базе данных) вычислены оценки медианного содержания 36 элементов-примесей в сухом тотальном океанском планктоне – и соответствующие значения КБП. А ведь именно на этих цифрах построены оценки биогенных вкладов (фракция $Me_{\text{био}}$) в черных сланцах. Таким образом, плодотворно применяя наш методический подход к определению баланса генетических форм элементов-примесей в осадках (главы 2 и 5), авторы отчего-то не используют наши результаты, которые вполне могли бы им пригодиться, поскольку сапропелевые отложения имеют сходство с рядом черных сланцев.

Основную ценность в этой главе представляют оригинальные аналитические данные (около 55 химических элементов) о составе планктона заливов Белого моря, озер и водохранилищ Сибири, полученные с помощью современных прецизионных методов, и в этом качестве не имеющие мирового аналога.

Установлено, что концентрации химических элементов в планктоне исследованных водоемов изменяются в пределах шести порядков (от 0,01 до 10000 г/т сухого вещества). Установлено главное отличие пресноводного планктона от морского: в морском примерно на порядок больше концентрации типичных талассофильных элементов Li, Vg и I.

Впервые исследован химический состав планктона крупнейших водохранилищ Сибири – Иркутского и Братского на 17 химических элементов, Новосибирского – на 53, малых бессточных озер с органическим типом осадконакопления – оз. Кирек (Западная Сибирь), оз. Очки и оз. Духовое (Восточная Сибирь) – на 48 химических элементов.

Самостоятельное научное значение представляют результаты исследования вещественного состава проб пресноводного, морского и галофильного планктона на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) с энергодисперсионной спектроскопией. Кроме того, как уже отмечалось авторами в главе 2, и сам метод сканирования планктонных образцов может быть рекомендован как наиболее надежный для подтверждения отсутствия в анализируемых пробах терригенного материала.

Глава 4 называется «*Специфика концентрирования химических элементов континентальным и морским планктоном*». Очевидно, что по сравнению с предыдущей главой, здесь авторы занимаются более детальным анализом эмпирических закономерностей концентрирования элементов-примесей планктоном – в зависимости от тех или иных геологических, гидрологических и биологических факторов.

Вначале авторы устанавливают парадоксальную эмпирическую закономерность: чем выше «геохимическая подвижность» данного химического элемента (то есть отношение концентраций «в растворе/во взвеси»), тем слабее он накапливается планктоном. Поэтому максимальные КБП проявляют самые инертные элементы, с ничтожными содержаниями в растворе морской или озерной воды (например, РЗЭ, Zr, Nb, Hf, Ta и Th), тогда как минимальные КБП показывают самые подвижные макроэлементы (Na, K, Mg, Ca).

Этот парадоксальный вывод, бесспорно, и важен, и интересен – но в приоритетности его авторам придется отказать: нами это было установлено еще в прошлом миллениуме: в приведенной в нашей книге 1994 г. таблице (с. 11) между величинами кларков воды океана и ранжированными величинами КБП видна совершенно отчетливая обратная корреляция:

- кларкам порядка 10^{-7} – 10^{-6} г/т отвечают КБП порядка 10^6 – 10^5 ;
- кларкам порядка 10^{-5} – 10^{-4} г/т отвечают КБП порядка 10^5 – 10^4 ;
- кларкам порядка 10^{-4} – 10^{-3} г/т отвечают КБП порядка 10^3 – 10^2 ;
- кларкам порядка 10^{-2} – 10^{-1} г/т отвечают КБП порядка 10^1 – 10^0

Например, для Pb с кларком в океане 3×10^{-5} г/т нами получен КБП = 3×10^5 , а для Sr с его высоким кларком 8 г/т – очень низкий КБП = 10.

Авторы проводят сопоставления состава планктона и донных осадков. Для этого строятся графики, где по абсциссе располагаются химические элементы в определенном порядке (от фосфора до урана), а по ординате – «коэффициенты обогащения» (ЕФ) в логарифмическом масштабе, вычисленные путем нормирования концентраций по скандию и кларкам глинистых сланцев Ли – отдельно для планктона и для осадков, что позволяет сравнить полученные кривые.

¹ Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 304 с.

Например, в сравнении с донными отложениями, планктон Новосибирского водохранилища сильнее всего обогащен фосфором ($EF > 100$), слабее ($10 < EF \leq 100$) обогащен Zn, Ca, Cu, Hg, Br, Sb, Cd и еще слабее – Sr, Ba, Mg, Na, Cr, Ni, Mo, Mn, Pb, Sn, As. В итоге авторы заключают, что планктон Новосибирского водохранилища имеет свои специфические особенности элементного состава в сравнении с донными отложениями, что выражается в его обогащении щелочными, щелочноземельными и халькофильными элементами.

Глава 5 полностью посвящена органогенным озерным осадкам – сапропелям и называется «*Геохимическая роль живого вещества в образовании органогенных отложений (сапропелей)*». Этот довольно замысловатый заголовок в действительности означает, что авторы будут выяснять долевого вклад концентрационной функции озерных гидробионтов (макрофитов, фито- и зоопланктона) в валовый химический состав сапропелей – то есть долю первично-биогенной генетической фракции $Me_{\text{био}}$.

В озера юга Западной Сибири в условиях относительно теплого климата поступает много нутриентов, что способствует развитию гидробионтов и как следствие – образованию сапропеля. Авторы дают оценки скоростей формирования сапропелей и молодых осадков водохранилищ сибирского региона. Впервые показаны значительно опережающие (в 200 раз) скорости накопления терригенных компонентов в донных осадках нижних частей водохранилищ по сравнению с органогенными. Однако в малых бессточных озерах скорости накопления органического вещества сопоставимы со скоростью поставки терригенного материала, что приводит к накоплению в озерах метровых толщ сапропелевых илов преимущественно автохтонного происхождения, обогащенных, в первую очередь, биогенными элементами. Предложенный авторами метод расчета доли первично-биогенной фракции $Me_{\text{био}}$ использует в качестве элементов-индикаторов такие общепризнанные биофильные элементы, как P, Br и Zn.

По аналогии с выделением в геохимии углей так называемых «углефильных элементов» авторы выделили элементы «сапропелефильные» – по величине зольных кларков концентрации ($KK = \text{отношение содержания конкретного химического элемента в золе сапропеля к кларку этого элемента в глинистом сланце}$). В итоге ими были выделены группы элементов-примесей в сапропелях, в двух классах озерных вод.

А. Для озер с гидрокарбонатным кальциевым классом вод (на примере сапропеля оз. Кирек):

- высоко «сапропелефильные»: P ($KK = 28$), Mn ($KK = 17$), Br ($KK = 15$), As ($KK = 15$);
- «сапропелефильные» ($3 \leq KK < 7$): Fe, Mo, Ca, Cd, Cu, Pb;
- слабо «сапропелефильные» ($1 \leq KK < 2$): Zn;
- «несапропелефильные» ($KK < 1$): щелочные и щелочноземельные элементы.

Б. Для термокарстовых озер с сульфатным кальциевым классом вод (на примере сапропеля оз. Очки):

- высоко «сапропелефильные»: Hg ($KK=20$), Pb ($KK=11$), P ($KK=8$);
- «сапропелефильные» ($3 \leq KK < 7$): Cd, Ag, Sb, Br, Zn;
- слабо «сапропелефильные» ($1 \leq KK < 2$): Cu, Se, Mo, U;
- «несапропелефильные» ($KK < 1$): щелочные и щелочно-земельные элементы.

Интересен и общий вывод: верхние слои озерных сапропелей (0–5 см) обогащаются халькофильными элементами, источником которых является атмосферный аэрозоль; этот вывод не противоречит литературным данным.

Используя полученные геохимические данные, авторы предложили оригинальную генетическую типизацию сапропелей сибирского региона, разделив их на (а) *высокальциевые макрофитогенные* (оз. Белое, периферия оз. Кирек), (б) *высокожелезистые планктоногенные* (глубоководная часть оз. Кирек) и (в) *низкожелезистые планктоногенные* (оз. Очки, Духовое).

По условиям формирования и химическому составу сапропелей, формирующихся в озерах Западной и Восточной Сибири, авторы предварительно заключили, что органическое вещество сапропелей озер Западной Сибири формируется в основном за счет водных растений (макрофитов), в озерах же Восточной Сибири (Прибайкалье и Забайкалье) – за счет планктона. Поэтому сапропели озер Западной Сибири преимущественно органо-минеральные среднеили высокозольные, озер Восточной Сибири – органические малозольные.

Глава 6 имеет прикладную направленность и называется «*Биогеохимическая индикация водных экосистем Западной и Восточной Сибири*». Здесь впервые в систему экологического мониторинга водоемов региона Сибири введен планктон в качестве информативного биогеохимического индикатора загрязнения водной среды тяжелыми металлами.

В частности, по результатам многолетних биогеохимических исследований (1992–1996 гг.) **Братское водохранилище** отнесено к техногенно-трансформированным водоемам. В верхней части водохранилища выявлено ртутное загрязнение всех компонентов экосистемы (вода, донные осадки, биота), связанное со сбросами ртутьсодержащих отходов комбината по производству хлора и каустической соды «Усольехимпром» (г. Усолье-Сибирское). Установлена общая закономерность пространственного распределения ртути в гидробионтах Братского водохранилища: концентрации металла в зоопланктоне, водных растениях, мышечной ткани рыб достигают максимума на верхнем участке водохранилища и убывают в направлении к нижней приплотинной части. Показано, что зоопланктон (*Daphnia galeata*, *Mesocyclops leuckartii*) является чутким биоиндикатором загрязнения водной среды ртутью. Повышенные относительно фона в 3–5 раз концентрации Hg в биообъектах верхнего участка водоема, подтвержденные независимой экспертизой в Свободном Брюссельском университете, послужили основанием для останова в 1998 г. цеха ртутного электроли-

за на комбинате «Усольехимпром». В нижней части Братское водохранилище подвергается воздействию отходов Братского лесопромышленного комплекса. Здесь в планктоне выявлены повышенные относительно фона концентрации Cu, что обусловлено технологией переработки древесины на деревообрабатывающих предприятиях.

Многолетний мониторинг состояния водной экосистемы *Новосибирского водохранилища* показал, что в нижней части водоема в районе интенсивного судоходного фарватера эпизодически появляются локальные участки загрязнения, регистрируемые по повышенным концентрациям Pb, Cu и Zn в планктоне относительно фона. Эти участки неустойчивы по своей локализации в пространстве и во времени и отражают «текущее загрязнение». В районе локального воздействия сточных вод г. Бердска планктоном фиксируются повышенные относительно фона концентрации Cr, Co, Ni, Mo, Cu и Br, а вблизи котельной пос. Речкуновки планктон отражает повышенные концентрации Cd и Pb.

Соленое оз. Большое Яровое по результатам многолетних мониторинговых наблюдений (1998–2004 гг.) отнесено к разряду техногенно-трансформированных водоемов. В осадках здесь содержания ртути в 7 раз больше фона, а в галофильном зоопланктоне (*Artemia salina*) в районе береговых отвалов ртутьсодержащих отходов комбината «Алтайхимпром» – в 5 раз больше по сравнению с фоном.

В **Заключении** авторами особо подчеркнуты те методические новации, которые характеризуют выполненную ими работу, а также повторены все те выводы, которые уже содержались в предшествующих главах. Такое повторение отнюдь не является излишеством, ибо существует категория читателей, которым некогда изучать всю книгу, но которые внимательно прочитают именно Заключение. В частности, указано, что впервые выполненная количественная оценка содержания широкого круга химических элементов в планктоне континентальных водоемов Сибири (около 55), глубоководных заливов Белого моря (40) и эстуарном планктоне в зоне действия маргинального фильтра р. Онеги (42) показала принципиальное геохимическое различие континентального, морского и океанского планктона, подтвердившее данные А.П. Виноградова о том, что в морских организмах в значительной степени концентрируются талассофильные элементы с нечетными порядковыми номерами Li (3), Na (11), P (15), Br (35), I (53).

Полученные данные по микроэлементному составу континентального планктона являются пионерными для сибирского региона и, как полагают авторы, реперными для будущих экологических исследований. С этим мнением можно полностью согласиться.

Таким образом, Г.А. Леонова и В.А. Бобров написали ценную книгу, насыщенную важной биогеохимической и экологической информацией.

Я.Э. Юдович,
заслуженный деятель науки РФ, академик РАЕН
г. Сыктывкар

