

УДК 597-153:591.524.12

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ КОРМОВЫХ РЕСУРСОВ МОЛОДИ НЕРКИ В ОЗЕРЕ АЗАБАЧЬЕ

Л. А. Базаркина



На основании анализа состояния кормовой базы молоди нерки и гидрохимического режима оз. Азабачье предлагается возможность повышения биологической продуктивности водоема путем внесения минеральных удобрений. Расчет баланса биогенных элементов показывает, что в 1998 г., несмотря на аккумуляцию минеральных форм азота и фосфора, в водоеме существовал дефицит минерального азота до 70 т. Из вырабатываемых химической промышленностью минеральных удобрений наиболее рентабельными являются селитры. Внесение нитратов задействует недоиспользованный минеральный фосфор и приведет к повышению численности диатомовых водорослей.

Озеро Азабачье является нагульно-нерестовым водоемом одного из крупнейших на Камчатском полуострове стад нерки. В озере проходит пресноводный период жизни нерки, как местной популяции, так и молоди популяций из притоков нижнего течения р. Камчатка, мигрирующей в озеро сеголетками (Бугаев, 1981). Молодь нерки на втором и третьем годах жизни в пелагиали озера питается преимущественно планктонными ракообразными *Cyclops scutifer* Sars и *Daphnia galeata* Sars, численность которых в водоеме определяет размерно-весовые характеристики смолтов (Бугаев и др., 1993; Бугаев, 1995).

Значительная убыль циклопов и дафний в озере происходит в годы высокой численности нагуливающих рыб и слабой вегетации диатомовых водорослей, в частности *Aulacoseira italica* (Kutz.) Simonsen, которая является основным кормом ведущего по численности вида ракообразных *C. scutifer*. При снижении концентрации аулякозиры в водоеме циклопы переходят на питание беспанцирными коловратками (Rotatoria), но в такие годы роста численности популяции не происходит (Базаркина, 2001).

В 1998 г. в экосистеме оз. Азабачье были отмечены критически низкие показатели биологической продуктивности водоема на всех трофических уровнях. По величине биомассы планктонных ракообразных мезотрофное оз. Азабачье стало соответствовать в — олиготрофному типу водоемов (Китаев, 1986).

Многолетние исследования показывают, что бурное цветение водорослей и повышение вторичной продукции в озере происходили после выпадения на водосбор водоема пепла действующих вулканов Ключевской группы: Безымянный — в 1956 (Куренков, 1975), 1986 гг., Толбачик — в 1975 г. (Бугаев, 1986) и Ключевская сопка — в 1990 г. Конечным итогом пеплопадов были мощные возвраты производителей нерки на нерестилища озера.

Роль биогенных добавок, как пускового механизма биологических процессов в нерковых водоемах, была теоретически обоснована Е.М. Крохи-

ным (1957, 1959) и экспериментально доказана искусственной фертилизацией озера Лиственничное в 1980 г. (Куренков, Куренков, 1988). Положительный эффект естественной фертилизации бассейна оз. Азабачье вулканическим пеплом (Куренков, 1975; Бугаев, 1986) и результаты внесения удобрений в лососевые озера («Проблемы фертилизации...», 1988) дают нам основание рекомендовать проведение фертилизационных работ в озере Азабачье в целях сохранения высокого уровня кормовой базы молоди нерки.

Цель настоящей работы — на основании имеющихся данных о численности планктонных организмов и гидрохимическом режиме оз. Азабачье за 1981–2000 гг. определить биогенные элементы, лимитирующие развитие *A. Italica*, и разработать стратегию проведения фертилизации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для исследований послужили результаты наблюдений за гидрохимическим режимом водоема и сетные ловы планктона, выполненные в глубоководной части пелагиали оз. Азабачье в 1981–2000 гг.

Изучение режима биогенных элементов в бассейне озера было начато в 1988 г. Гидрохимические пробы отбирали четырехлитровым батометром Молчанова с глубин 0, 10, 20, 30 м в устье р. Бушуева и в истоке р. Азабачья. Гидрохимические анализы озерных вод и водной вытяжки из пепла вулкана Ключевская сопка были выполнены сотрудниками КамчатНИРО Т.К. Уколовой и В.Д. Свириденко согласно «Руководству по химическому анализу вод суши» (Алекин и др., 1973).

Отбор планктонных проб производили сетью Джеди средней модели (газ № 67) один раз в подледный период и ежедекадно в летне-осенние месяцы. Планктонные пробы обрабатывали по стандартным в гидробиологии методам (Киселев, 1956). Биомассу планктонных организмов рассчитывали как произведение их численности на среднюю массу одного экземпляра. Средние значения массы яиц и науплиусов циклопов были

заимствованы из работы С.П. Белоусовой (1970). Среднюю массу тела копеподитов *Copepoda* и особей *Cladocera* определяли по зависимости: $w = ql^b$, где w — масса тела рачков (мг); l — длина тела (мм); q и b — эмпирические константы для каждого отдельного вида (Балушкина, Винберг, 1979).

Баланс фосфора и азота в озере рассчитывали по методу Е.М. Крохина (1967). Количество молоди нерки, одновременно нагуливающейся в пелагиали водоема и скатывающейся из озера, оценивали условно по численности отнерестившихся производителей в бассейне оз. Азабачье и в притоках нижнего течения р. Камчатка, от которых эта молодь происходит (Ricker, 1954; Бугаев и др., 1993). При этом использовали данные авиационных учетов заполнения нерестилищ неркой бассейна оз. Азабачье в 1980–2000 гг., проведенных сотрудниками КамчатНИРО А.Г. Остроумовым, К.Ю. Непомнящим и А.В. Масловым. Содержание фосфатов и азота в отнерестившейся нерке и в скатывающейся молоди было принято по Кизветтеру (1942, 1971). При расчете содержания минерального азота в теле рыб исходили из количества белка во всех тканях нерки, деленного на коэффициент 6,25 (Клейменов, 1971).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимический режим. Химический режим вод озера определяется, в основном, притоком речных и грунтовых вод, состав которых формируется путем выветривания, вымывания и дренирования изверженных пород, слагающих бассейн водоема.

Исходя из количества и соотношения ионов в водах озера (суммарная концентрация ионов 85,0 мг/л: Ca — 10,8 мг/л, Mg — 3,3 мг/л, Na+K — 7,8 мг/л, HCO_3^- — 47,1 мг/л, SO_4^{2-} — 10,3 мг/л, Cl — 5,7 мг/л) оз. Азабачье относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу с пресной мягкой мало минерализованной водой (Алекин, 1975). Многолетние изменения концентрации основных ионов как на поверхности, так и по глубине водоема незначительны. Наибольшая минерализация вод озера 130,0 мг/л обычно наблюдается в период летнего половодья, что приводит к повышению мутности и снижению прозрачности воды до двух метров. К установлению ледового покрова суммарная концентрация ионов понижается до 60,7 мг/л, прозрачность воды увеличивается до 6,0 м.

Большое значение для развития и роста гидробионтов имеют биогенные вещества — азот, фосфор, кремний и железо, которые организмы получают с пищей и из воды. Биогены участвуют в формировании клеток и створок водорослей, хитиновых и панцирных покровов зоопланктон-

ных и бентосных организмов, чешуи и костно-мышечных тканей рыб, входят в состав хлорофилла растений и крови водных животных.

Режим биогенных веществ в водоеме определяется их притоком с осадками, с поверхностными и грунтовыми водами, с телами отнерестившихся погибших особей нерки, и выносом речным стоком р. Азабачья и с покатной молодью рыб. Круговорот биогенов в озере совершается в результате биохимической деятельности водных организмов и гидрологических процессов: перемешивания водных масс, их водообмена и взаимодействия с атмосферой.

Максимальные величины концентрации биогенных веществ, за исключением нитратов, наблюдаются в гипolimнионе озера в периоды установления зимней и летней стагнации, что обусловлено минерализацией органического вещества и диффузией элементов из донных отложений. В подледный период концентрация железа у дна водоема возрастает до 0,40 мг/л, фосфатов PO_4 — до 0,060 мг P/л, кремния — до 6,0 мг/л, что приводит к снижению насыщения вод гипolimниона кислородом до 50–60% и ускорению процессов аммонификации. При этом в придонном слое количество аммония возрастает до 0,130 мг N/л, а нитратов и нитритов убывает до 0,025 мг N/л и до 0,002 мг N/л соответственно (рис. 1, 2, 3). Содержание биогенов в эпилимнионе озера в подледный период невелико. Сильная отрицательная корреляция между нитратами и аммонием ($r = -0,78$, $P = 0,95$) в зимние месяцы свидетельствует о преобладании в подледный период восстановительных процессов.

При исследовании донных отложений оз. Азабачье И.М. и В.Я. Леванидовы (1972) не обнаружили черных илов с запахом сероводорода, характерных для профундали многих озер. Очевидно, роль восстановителя в данном случае выполняет легкоокисляемое двухвалентное железо. Нерастворимые соединения окиси железа в процессе гидролиза приобретают желто-бурый цвет и, осе-

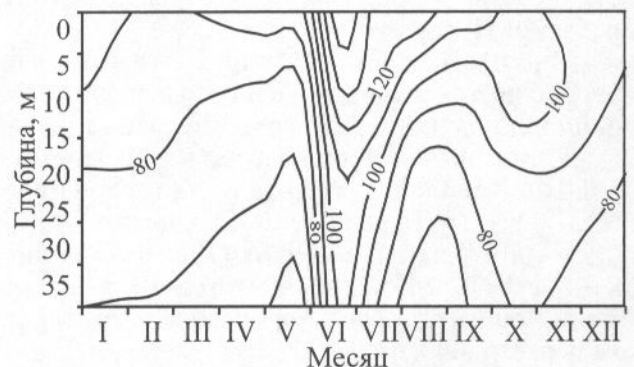


Рис.1. Сезонные изменения среднееголетних значений процентного насыщения кислородом вод пелагиали оз. Азабачье

дая на дно, придают органическому веществу коричневую окраску. При действии на растворы солей железа цианистых соединений образуется ферроцианид железа, который в виде голубой пленки адсорбируется на планктонных организмах (Harvey, 1939). Постоянное накопление разлагающегося планктона на дне озера, вероятно, является причиной образования синеватого ила в глубоководной части пелагиали водоема.

В июне после вскрытия водоема в результате полной циркуляции водных масс поверхностные воды обогащаются биогенами, а гипolimнион кислородом до 100% насыщения. Поверхностный сток талых вод с водосбора пополняет содержание всех биогенных веществ в слое 0–5 м до максимальных значений, за исключением солевого аммония, который из-за высокого насыщения здесь вод кислородом быстро проходит стадии нитрификации до нитрата (рис. 1, 2, 3).

В период половодья наибольший приток р. Бушуева вносит в водоем в среднем 0,045 мг P/л фосфатов PO₄, 0,143 мг N/л нитратов NO₃, 0,120 мг N/л нитритов NO₂, 0,210 мг N/л аммо-

ния NH₄, 0,110 мг/л железа Fe и 8,0 мг/л кремния Si. В это же время со стоком р. Азабачья из озера выносится значительное количество биогенных веществ: PO₄ — 0,056 мг/л, NO₃ — 0,120 мг/л, NO₂ — 0,084 мг/л, NH₄ — 0,127 мг/л, Fe — 0,070 мг/л, Si — 5,5 мг/л. В период осенней межени приток и вынос биогенов с поверхностным стоком минимальны.

Повышение содержания биогенных веществ в трофогенном слое приводит к бурному развитию диатомовых водорослей. В июне–июле в процессе фотосинтеза в эпилимнионе происходит интенсивное поглощение биогенов водорослями и повышение концентрации кислорода до 18 мг O₂/л (до 150% насыщения). В августе, по завершении летнего пика цветения фитопланктона, концентрация биогенных веществ в поверхностном слое резко снижается вплоть до аналитического нуля, а насыщение вод кислородом убывает до 120% (рис. 1).

В июле–сентябре отмирающие планктонные организмы опускаются ко дну водоема, что приводит к постепенному накоплению биогенов в гипolimнионе. В сентябре в позднюю фазу летней стагнации концентрация аммония в придонном слое составляет 0,094 мг N/л, нитратов — 0,020 мг N/л, нитритов — 0,004 мг N/л, железа — 0,28 мг/л, фосфатов — 0,042 мг P/л и 5,3 мг/л кремния (рис. 2, 3).

В октябре полная циркуляция озерных вод обогащает поверхностные воды биогенными веществами, что вызывает в ноябре повторную вспышку цветения диатомовых водорослей,

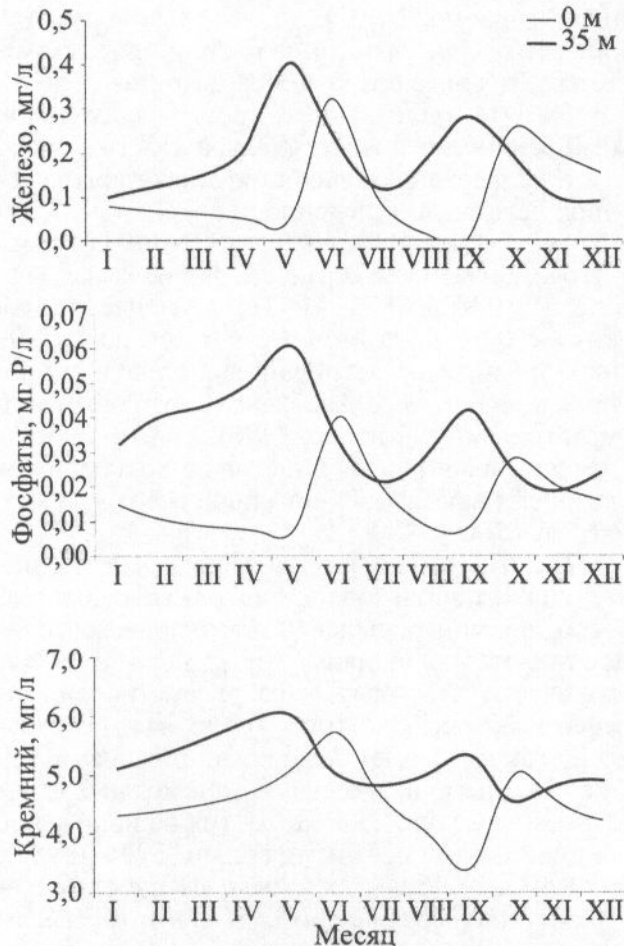


Рис. 2. Многолетние изменения среднемесячных значений концентрации общего железа, фосфатов (PO₄) и кремния на поверхности (0 м) и у дна (33 м) оз. Азабачье в 1988–2000 гг.

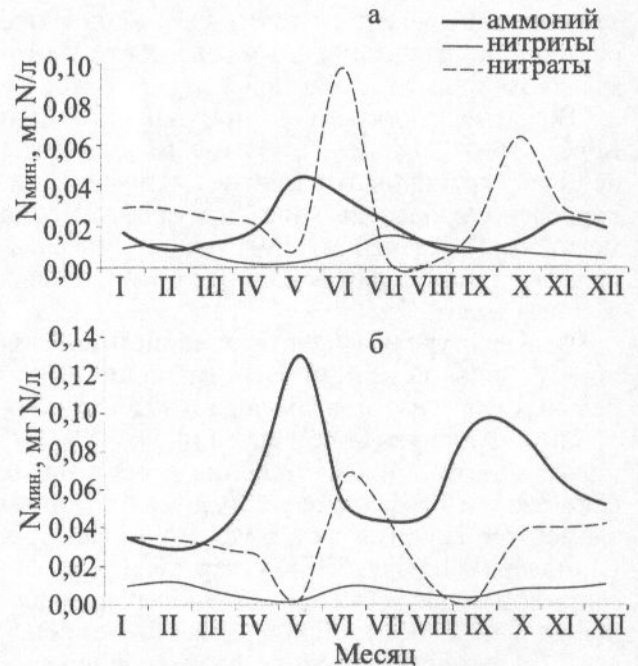


Рис. 3. Многолетние изменения среднемесячных значений концентрации минеральных форм азота на поверхности (а) и у дна (б) оз. Азабачье в 1988–2000 гг.

иногда по численности превышающую первую летнюю. К установлению ледостава вегетация фитопланктона завершается, и насыщение вод кислородом, как в поверхностном, так и придонном слое, убывает. Количество биогенных веществ в эпилимнионе заметно понижается, а у дна озера начинает возрастать (рис. 1, 2, 3).

В летне-осенние месяцы количество нитратов в озере находится в зависимости от концентрации аммонийного азота: $\text{NO}_3 = 0,027 + 1,278 \text{NH}_4$ ($r = 0,76$, $P > 0,95$). Очевидно, процесс $\text{NO}_3 \leftrightarrow \text{NH}_4$ можно рассматривать как буферную систему, обеспечивающую высокую сопряженность перехода одной формы минерального азота в другую. Корреляция между NO_2 и NO_3 слабая и недостоверная, что свидетельствует о высоких скоростях аммонификации в подледный период и нитрификации в летне-осенние месяцы.

Количество нитритов в оз. Азабачье не превышает 0,005 мг/л, что характерно для незагрязненных, достаточно насыщенных кислородом озер. По динамике гидрохимических процессов и концентрации биогенных веществ озеро Азабачье относится к типично мезотрофным водоемам, соответствующим нормам для воспроизводства и нагула лососевых рыб (Thienemann, 1930; «Лабораторный практикум ...», 1983).

Выбор стратегии проведения фертилизации. Опыт проведения фертилизационных работ показывает, что наиболее перспективными удобрениями являются сложные минеральные соединения — типа аммофоса, селитры и нитрофоски. При выборе вида удобрений необходимо знать баланс биогенных веществ в водоеме и какой из элементов более рентабелен для увеличения численности диатомовых кормовых водорослей.

Воды озера богаты кремнием (4,0–6,6 мг/л) и железом (0,10–0,40 мг/л), поэтому эти элементы не могут ограничивать развитие диатомовых водорослей. Особое внимание следует обратить на межгодовые изменения концентраций минеральных форм азота и фосфора и их соотношения в озерных водах.

В литературе не существует единого мнения об оптимальной величине соотношения минеральных форм азота и фосфора в водоемах. Головин и Флорчук (Golowin, Florczyk, 1983/84) полагают, что при соотношении минеральных форм азота и фосфора менее 16, лимитирующим элементом является азот, более 16 — фосфор. Шиндлер (Schindler, 1975) утверждает, что благоприятным для развития диатомовых водорослей является соотношение 13:1. По Винбергу (1953/54) отношение азота к фосфору в водоеме должно соответствовать этому отношению в теле водорослей — 4–6:1. По данным Гусевой (1961) одна клетка водоросли содержит 9% азота и не

более 1,6% фосфора. Согласно нормам рыбоводства для лососевых озер соотношение минеральных азота и фосфора должно быть равным 5,6 («Лабораторный практикум ...», 1983).

В нашей ситуации верный подход к решению данной проблемы — проанализировать, как изменялись концентрация минеральных форм азота и фосфора в водоеме, величины их соотношения и биомассы планктонных ракообразных после выпадения пепла на водосбор озера в апреле 1990 г. при извержении вулкана Ключевская сопка в последующие годы.

Водная вытяжка из пепла вулкана Ключевская сопка содержала: 0,198 мг N/л нитритов, 0,055 мг N/л нитратов, 0,830 мг N/л аммония, 0,035 мг P/л фосфатов PO_4 , 0,095 мг/л общего железа и 3,00 мг/л кремния. Соотношение минерального азота ($N_{\text{мин}}$) и минерального фосфора ($P_{\text{мин}}$) в вытяжке составляло 31:1. Во второй половине июня 1990 г. после вскрытия водоема в озерных водах отношение $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}}$ было равно 9:1. Несмотря на такое высокое соотношение, увеличение количества клеток аулякозиры до 930 тыс. кл./л произошло только в первой декаде ноября 1991 г. по окончании полной осенней циркуляции при $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} = 7:1$. Очевидно, указанный интервал времени соответствует продолжительности цикла полного оборота азота в озере.

В 1991 г. средняя численность *A. italica* за летне-осенние месяцы составляла 187 тыс. кл./л, а в 1992 г. среднее количество аулякозиры за период вегетации повысилось до 214 тыс. кл./л (0,33 г/м³) (рис. 4). В течение 1990–1993 гг. среднегодовая биомасса кормовых ракообразных возросла от 0,83 до 2,75 г/м³. Тем не менее при таких высоких показателях биомассы планктонных организмов эвтрофирования водоема не произошло и озеро Азабачье сохраняло статус мезотрофного (Китаев, 1986). Конечным итогом пеплопада явился мощный возврат производителей нерки на нерестилища озера в 1995 г. (690 тыс. шт.).

В 1991–1992 гг. многочисленная *A. italica* интенсивно использовала биогенные вещества, особенно минеральный азот, что привело к снижению соотношения $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}}$ до 5. В 1994 г. количество аулякозиры в озере заметно понизилось до 72 тыс. кл./л (рис. 4), что было обусловлено как выеданием водоросли циклопами, так и снижением соотношения минеральных форм азота и фосфора до 4. Несмотря на понижение биомассы ракообразных в течение 1995–1998 гг. от 1,40 до 0,96 г/м³, в 1998 г. количество клеток *A. italica* составляло 17 тыс. в литре. Пятикратное снижение численности аулякозиры, по сравнению со среднемноголетним значением 88 тыс. кл./л, можно объяснить низкой величиной соотношения минеральных форм азота и

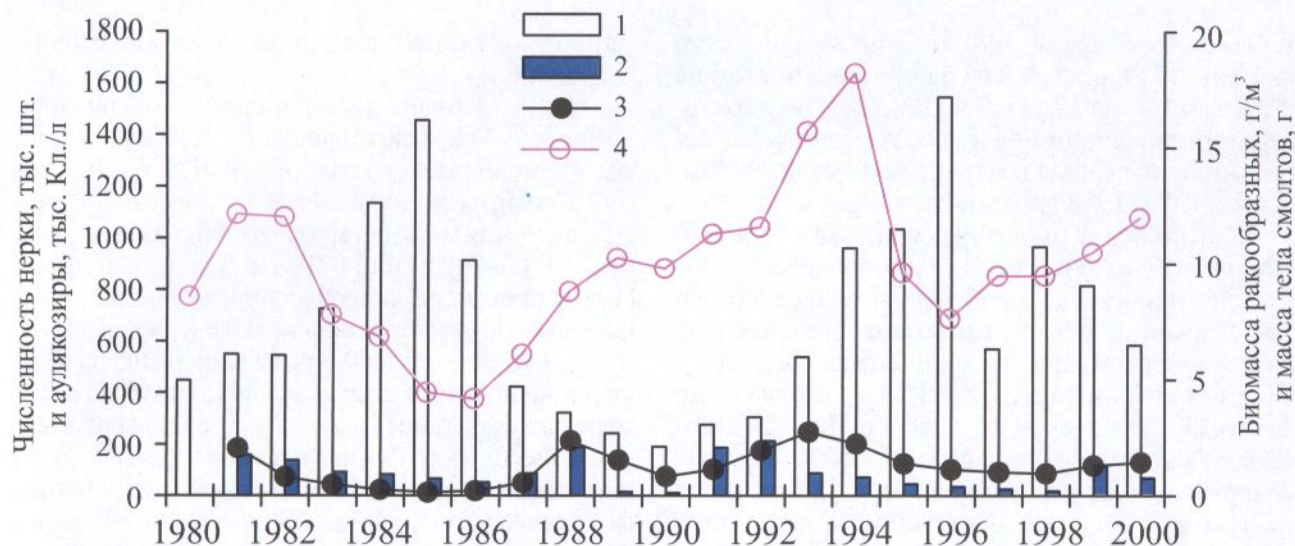


Рис. 4. Многолетние изменения количества одновременно нагуливающейся молоди нерки (1), средней численности *A. italica* за летне-осенние месяцы (2), среднегодовой биомассы ракообразных (3) и массы тела смолтов нерки азабачинского стада (4) в оз. Азабачье в 1981–2000 гг.

фосфора, равной 2. При такой пониженной численности *A. italica* в озере можно ожидать и снижение биомассы кормовых ракообразных в последующие годы.

Баланс биогенных веществ в озере определяется разностью между их поступлением и выносом из водоема (табл. 1).

Количество биогенов, поступающих с атмосферными осадками на поверхность оз. Азабачье, рассчитывали как произведение площади озера 56,5 км² на среднегодовую норму осадков 700 мм, в которой 60% составляет снег («Ресурсы поверхностных вод СССР», 1973). По данным Т.К. Уколовой (Миловская и др., 1990) в осадках в виде дождя содержится 11,54 мкг Р/л фосфатов PO₄ и 245,5 мкг N/л минерального азота, в снеге — 3,34 мкг Р/л PO₄ и 41,00 мкг N/л N_{мин.}

Грунтовый сток в течение года постоянен, его величина 0,473 км³ равна стоку вод из озера в период межени, когда объем вод водоема пополняется только за счет грунтового питания. Грунтовые воды содержат 100,0 мкг Р/л P₂O₅ (66,9 мкг Р/л PO₄)

и 270,0 мкг N/л N_{мин.} (Крогиус и др., 1987), но при фильтрации грунтовых вод через ложе водоема в озеро поступает меньшее количество биогенов, поэтому следует полагать, что рассчитанная величина поступления фосфатов и азота с подземными водами несколько завышена.

В озеро впадает около 15 притоков, среднегодовой расход наиболее крупных водотоков равен 2–7 м³/с. В водах рек в среднем содержится 0,080 мг N/л минерального азота и 0,038 мг Р/л фосфатов PO₄.

Объем стока вод из озера был определен исходя из величины среднегодового расхода воды р. Азабачья, равного 20 м³/с. В среднем за год из водоема речным стоком выносятся 23 т фосфатов PO₄ и 38 т минерального азота.

Наибольший приток минеральных форм азота и фосфора в водную толщу озера идет из бентали водоема. Поступления биогенов от отнерестившихся рыб невелики даже в годы переполнения нерестилищ. Так, в 1995 г. при самом высоком по численности заходе производителей нер-

Таблица 1. Оценка среднемноголетнего баланса минеральных форм фосфора (PO₄) и азота (N) в оз. Азабачье за 1988–1998 гг.

Элементы баланса	Объем стока, км ³	PO ₄ , т	N, т
Приток			
Атмосферные осадки	0,040	0,027	4,91
Грунтовый сток	0,473	31,64	127,71
Поверхностный сток	0,380	14,44	30,40
Сненка (280 тыс. шт.)		1,18	14,60
Всего	0,893	47,28	177,62
Сток			
р. Азабачья	0,630	22,8	37,80
Смолты (52900 тыс. шт.)		1,44	12,85
Всего		24,12	50,65
Аккумуляция	0,263	23,16	126,97
Коэффициент седиментации, %		48,9	71,5

ки в оз. Азабачье — 690 тыс. шт., количество фосфатов PO_4 в водоеме увеличилось только на 3 т, а азота — на 37 т (табл. 1, 2). Поэтому достоверной корреляции между поступлением биогенов со сненкой в водоем и численностью аулякозиры в 1978–1998 гг. не обнаружено.

Соотношение биогенных веществ в теле рыб с возрастом изменяется. В теле молоди, скатывающейся из озера, содержится 0,49% фосфатов и 2,90% азота. В период миграции взрослых рыб из моря в пресную воду, количество фосфатов в теле нерки снижается до 0,28%, азота — до 2,34% (Кизеветтер, 1942, 1971). При среднем весе красной азабачинского стада 2,3 кг в ее теле содержится 4,27 г фосфатов PO_4 и 52,9 г азота.

Из озера Азабачье одновременно скатываются двухгодовики азабачинской популяции и годовики популяций нижнего течения р. Камчатка, имеющие среднюю массу тела 8,5 г и 7,0 г, соответственно. При этом в теле двухгодовиков содержится 0,028 г фосфатов PO_4 и 0,25 г азота, в теле годовиков — 0,023 г фосфатов PO_4 и 0,21 г азота. Количество минерального фосфора и азота, выносимого из озера со смолтами, незначительно и в среднем соответственно составляет

7 и 25% от общей величины стока биогенов из озера (табл. 1, 3).

По Фолленвайдеру и Диллону (Vollenweider, Dillon, 1974) в мезотрофном оз. Азабачье с учетом времени полного водообмена 1,8 года и средней глубины водоема 18,2 м допустимая нагрузка общим фосфором должна составлять 0,63 г P/(м²×год) или 0,027 мг P/л. Стравинская (1980), проследив за процессом изменения трофического статуса мезотрофного оз. Красное (Пуннус), отмечает, что в 60-е годы минеральный фосфор в водах озера составлял 44% от общего. По мере эвтрофикации водоема в 70-е годы содержание минерального фосфора возросло до 56%. Если принять допустимое содержание минерального фосфора в мезотрофном озере Азабачье равным 44% от общего, то величина допустимой нагрузки минеральным фосфором должна составлять 0,012 мг P/л или 12 т для всей толщи водоема.

Несмотря на то, что из озера речным стоком р. Азабачья выносится значительное количество фосфатов (23 т), в водоеме седиментируется до 50% $P_{\text{мин}}$ от его притока в озеро, что создает повышенную нагрузку на водоем минеральным фосфором, равную 23 т (табл. 1). Количество

Таблица 2. Поступление фосфатов (PO_4) и азота (N) со сненкой в оз. Азабачье в 1988–1998 гг.

Год	Число рыб, тыс. шт.	PO_4 , кг	PO_4 / W оз., мг P/м ³	N, кг	N / W оз., мг N/м ³
1988	46	197	0,19	2433	2,37
1989	51	219	0,21	2698	2,63
1990	67	288	0,28	3544	3,45
1991	93	399	0,39	4920	4,80
1992	351	1507	1,47	18568	18,10
1993	394	1692	1,65	20843	20,31
1994	470	2017	1,97	24863	24,23
1995	690	2962	2,89	36501	35,58
1996	268	1151	1,12	14177	13,82
1997	468	2009	1,96	24757	24,13
1998	138	592	0,58	7300	7,12
Среднее	276	1184	1,15	14600	14,23

Примечание: W оз. = 1,026 км³ — объем озера

Таблица 3. Сток минерального фосфора (PO_4) и азота (N) с покатной молодью годовиков популяций нерки нижнего течения р. Камчатка (Е) и двухгодовиков нерки азабачинского стада (А) из оз. Азабачье в 1988–1998 гг.

Год	Число рыб, тыс. шт.			PO_4 , кг			N, кг		
	Е	А	Всего	Е	А	Всего	Е	А	Всего
1988	3648	50893	54541	82,7	1425,0	1507,7	766,1	12723,2	13489,3
1989	6810	14157	20967	154,3	396,4	550,7	1430,0	3539,2	4969,2
1990	3891	23834	27725	88,2	667,3	755,5	817,2	5958,4	6775,6
1991	5715	8243	13958	129,5	230,8	360,3	1200,2	2060,8	3261,0
1992	9606	9139	18745	217,7	255,9	473,6	2017,3	2284,8	4302,1
1993	8937	12006	20943	202,5	336,2	538,7	1876,9	3001,6	4878,5
1994	5836	16656	22492	132,3	466,6	598,9	1225,7	4166,4	5392,1
1995	13193	62899	76092	299,1	1761,2	2060,3	2770,7	15724,8	18495,5
1996	10397	70605	81002	235,7	1976,9	2212,6	2183,3	17651,2	19834,5
1997	23590	84224	107814	534,7	2358,3	2893,0	4954,0	21056,0	26010,0
1998	14227	123648	137875	322,5	3462,1	3784,6	2987,7	30912,0	33899,7
Среднее	9623	43301	52924	218,1	1212,4	1441,5	2020,8	10825,3	12846,1

минерального азота, выносимого водами р. Азабачья, невелико — 38 т (21% от его притока), следовательно, в озере в среднем за год должно аккумулироваться до 127 т $N_{\text{мин}}$. Фактически нагрузка минеральным азотом на водоем была ниже и в среднем за 1988–1998 гг. составляла 84 т. Снижение количества минерального азота в 1990–1994 гг. от 134 до 74 т было явно обусловлено интенсивной ассимиляцией биогена аулякозирой. В 1995–1998 гг. при дальнейшем понижении фактической нагрузки $N_{\text{мин}}$ от 74 до 57 т, минеральный азот стал лимитирующим фактором развития *A. italica*.

Исходя из оптимального соотношения минеральных форм азота и фосфора в водах озера, равного 6, для благоприятного развития диатомовых водорослей необходимо, чтобы величине 23 т (0,023 мг Р/л) PO_4 соответствовало 0,138 мг N/л минерального азота, или 140 т для всего озера. Следует полагать, что в водоеме в 1994–1998 гг. в среднем за год складывался избыток фосфатов 11 т и дефицит минерального азота 43 т.

В 1998 г. среднее количество фосфатов в озере возросло до 0,030 мг Р/л (31 т), а минерального азота понизилось до 0,056 мг N/л, что привело к повышению избытка фосфатов до 19 т и дефицита минерального азота до 70 т.

В озере фосфатов достаточно, поэтому такие минеральные удобрения, как аммофос и нитрофоска, непригодны, поскольку в них велико содержание фосфора PO_4 : моноаммонийфосфат $NH_4H_2PO_4$ — 83%, диаммонийфосфат $(NH_4)_2HPO_4$ — 72%, нитроаммофоска — 66%.

Из вырабатываемых химической промышленностью сложных минеральных удобрений следует выбрать хорошо растворимые в воде селитры. Из селитр наиболее выгодной была бы аммиачная селитра NH_4NO_3 , содержащая 78% нитратов и 22% аммония, но в присутствии горючих веществ нитрат аммония образует взрывчатые смеси, что может вызвать затруднения с ее доставкой на озеро. Тем не менее в Центральной России аммиачная селитра широко применяется для удобрений водоемов и не создает осложнений. Из других селитр наибольшее количество нитратов (76%) содержится в кальциевой селитре $Ca(NO_3)_2$. Внесение нитрата приведет к снижению избыточного количества минерального фосфора, а кальций будет способствовать разрушению органических веществ, работе нитрифицирующих и азотсобирающих бактерий и аэрации донного ила.

Расчеты показали, что для устранения дефицита минерального азота, возникшего в озере в 1998 г., было бы необходимо внести 90 т кальциевой селитры или 70 т аммиачной, но в качестве эксперимента было бы достаточным 60 т нитрата кальция или 45 т нитрата аммония.

В 1999–2000 гг. предполагаемого снижения численности ракообразных не произошло. В 1999 г. биомасса пелагических ракообразных в озере составляла 1,30 г/м³, что было несколько выше среднемноголетней величины 1,23 г/м³, при этом, по личному сообщению В.Ф. Бугаева, у покатной молоди нерки в 1999–2000 гг. обозначилась тенденция повышения массы тела (рис. 1). Повышение численности рачков, вероятно, обусловлено как снижением численности нагуливающейся в озере нерки, так и вспышкой цветения *A. italica* в октябре 1999 г. (630 тыс. кл./л), когда соотношение минеральных форм азота и фосфора в водоеме было равно 6,7. Причиной повышения концентрации минерального азота явилось выпадение пепла на бассейн озера в декабре 1997 г. при извержении вулкана Безымянный.

Эффект естественной фертилизации озера пеплом не вызывает сомнений, но, несмотря на то, что вулканы Ключевской группы и Шивелуч активизируются часто, выпадение пепла на водосбор водоема происходит только при преобладании ветров западного и северо-западного направлений, что, в среднем, случается один раз в 10 лет. Поэтому, в целях сохранения кормовых ресурсов молоди нерки на оптимальном уровне, необходимо контролировать соотношение минеральных форм азота и фосфора в водоеме и уже при их соотношении, равном 4, следует пополнить запас биогенов в озере минеральным азотом. Если соотношение минерального азота и фосфатов окажется более 16, то следует внести в водоем фосфорсодержащие удобрения в рассчитанном количестве (Golowin, Florczyk, 1983/84), поскольку уже при $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}}$ более 13 в озере начнут интенсивно развиваться синезеленые водоросли (Schindler, 1975). Удобрения рекомендуем вносить в период отсутствия ледостава в глубоководной части пелагиали озера по направлению стокового течения р. Бушуева от ее устья до центра водоема перед началом летней или осенней полной циркуляции вод. По нашим расчетам, результаты фертилизации озера, в данном случае селитрой, можно ожидать не ранее, чем через полгода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запасы кормовых ресурсов молоди нерки в оз. Азабачье определяются, с одной стороны, численностью нагуливающих рыб-планктонофагов, с другой стороны, уровнем развития популяций планктонных организмов. Одним из основных факторов, регулирующих динамику пелагических ракообразных, является обеспеченность рачков кормовым фитопланктоном, в частности *A. italica*.

Численность диатомовых водорослей в период вегетации зависит от концентрации биогенных веществ, поступающих в эвфотическую

зону с поверхностным стоком в период половодья и из бентали водоема по завершении летней и осенней циркуляций водных масс. Другими источниками биогенных веществ в оз. Азабачье являются отнерестившиеся производители нерки и пеплопады действующих вулканов Ключевской группы и Шивелуча. Поступления биогенов в оз. Азабачье со сненкой, даже в годы переполнения нерестилищ, невелики, а фертилизация водоема вулканическим пеплом неоднократно приводила к глобальным изменениям в экосистеме озера (Куренков, 1975; Бугаев, 1986).

Анализ гидрохимических и гидробиологических процессов, происходивших в оз. Азабачье в 1990–2000 гг. после выпадения пепла вулкана Ключевская сопка на бассейн водоема в апреле 1990 г., позволил нам определить критерии расцвета и затухания биологической продуктивности озера.

Пусковым механизмом бурной вегетации аулякозиры в 1991–1992 гг. (200 тыс. кл./л) является минеральный азот, внесенный в озеро с вулканическим пеплом в 1990 г., в водной вытяжке которого отношение минеральных форм азота и фосфора составляло 31:1, а в водах озера оказалось равным 9:1.

Среднегодовалая численность *A. italica* за 1981–2000 гг. составляет 88 тыс. кл./л, а биомасса ракообразных — 1,23 г/м³. При соотношении $N_{\text{мин.}}:P_{\text{мин.}} = 4:1$ (1994 г.) численность *A. italica* начинает заметно понижаться, но падения численности рачков не происходит, и по биомассе пелагических ракообразных оз. Азабачье сохраняет мезотрофный уровень (Китаев, 1986). При соотношении минеральных форм азота и фосфора, равном 2 (1998 г.) количество аулякозиры достигает критического минимума 17 тыс. кл./л, а величина биомассы кормовых ракообразных в озере снижается до 0,96 г/м³, что соответствует олиготрофному типу водоемов.

Баланс биогенных элементов в озере положительный. В среднем за год в водоеме аккумулируется 23 т фосфатов и 127 т минерального азота, когда допустимая нагрузка минеральным фосфором для оз. Азабачье составляет 12 т (Vollenweider, Dillon, 1974; Стравинская, 1980). Накопление неиспользованных фосфатов в водоеме происходит в результате интенсивной ассимиляции аулякозирой минерального азота и приводит к образованию дефицита $N_{\text{мин.}}$ до 70 т (1998 г.).

Восполнить недостающее количество минерального азота в водах озера возможно путем внесения в водоем азотсодержащих минеральных удобрений. Из вырабатываемых химической промышленностью комплексных удобрений наиболее рентабельны хорошо растворимые в воде селитры (аммиачная или кальциевая). Фертилизация озера нитратом кальция будет способ-

ствовать снижению избыточного количества минерального фосфора, разрушению органических веществ и аэрации донного ила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алекин О.А., Семенов А.Д., Скотинцев Б.А. 1973. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат. 269 с.

Алекин О.А. 1975. Химия озер // Гидрология озер и водохранилищ. М.: МГУ. Ч. 1. С. 32–46.

Базаркина Л.А. 2001. О значении биогенов для развития циклопов в лососевом озере // VIII съезд Гидробиологического общества РАН: Тез. докл. Калининград: Атлант. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 1. С. 80–81.

Балушкина Е.Ф., Винберг Г.Г. 1979. Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. Л.: Наука. С. 58–79.

Белоусова С.П. 1970. Определение веса некоторых планктонных ракообразных по размерам тела // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 73. С. 122–126.

Бугаев В.Ф. 1981. О молодежи генеративно-реофильной формы нерки (*Oncorhynchus nerka* Walbaum), мигрирующей в озеро Азабачье из притоков реки Камчатка // Вопр. ихтиологии. Т. 12. Вып. 5. С. 800–808.

Бугаев В.Ф. 1986. Динамика численности нерки в оз. Азабачье // Рыб. хоз-во. № 12. С. 30–31.

Бугаев В.Ф. 1995. Азиатская нерка (пресноводный период жизни, структура локальных стад, динамика численности). М.: Колос. 464 с.

Бугаев В.Ф., Базаркина Л.А., Дубынин В.А. 1993. Межгодовая изменчивость роста чешуи транзитной и аборигенной молодежи нерки *Oncorhynchus nerka* в зависимости от кормовых и температурных условий в оз. Азабачье (Камчатка) // Вопр. ихтиологии. Т. 33. Вып. 5. С. 651–658.

Бугаев В.Ф., Бугаев А.В. 2000. Восстановление длины и массы тела смолтов нерки *Oncorhynchus nerka* (Walbaum) (Salmonidae) стада оз. Азабачье по структуре чешуи половозрелых рыб // Исслед. биологии и динамики числен. пром. рыб камчатского шельфа. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. Вып. V. С. 68–73.

Винберг Г.Г. 1953/54. Исследование потребности в минеральных удобрениях рыбоводных прудов БССР // Ученые записки БГУ. Вып. 17. С. 20–37.

Гусева К.А. 1961. Факторы, обуславливающие развитие фитопланктона в водоеме // Первичная

продукция морей и внутренних водоемов. Минск: Учпедгиз. С. 301–307.

Кизеветтер И.В. 1942. Технологические характеристики дальневосточных промысловых рыб // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 21. С. 5–36.

Кизеветтер И.В. 1971. Технологическая и химическая характеристика промысловых рыб Тихоокеанского бассейна. Владивосток: Дальиздат. С. 104–114.

Киселев Н.А. 1956. Методы исследования планктона // Жизнь пресных вод СССР. Л.: ЗИН АН СССР. Т. IV. Ч. 1. С. 253–258.

Китаев С.П. 1986. О соотношении некоторых трофических уровней и «шкалах трофности» озер разных природных зон // V съезд Всесоюзного гидробиологического общества: Тез. докл. Куйбышев: Волжская коммуна. Ч. II. С. 254–255.

Клейменов И.Я. 1971. Пищевая ценность рыб. М.: Пищевая пром-сть. С. 12–33.

Крогиус Ф.В., Крохин Е.М., Менишуткин В.В. 1987. Тихоокеанский лосось – нерка в экосистеме озера Дальнего (Камчатка). Л.: Наука. С. 88–100.

Крохин Е.М. 1957. Источник обогащения нерестовых озер биогенными элементами // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 45. С. 31–54.

Крохин Е.М. 1959. О влиянии количества отнерестовавших в озере производителей красной (*O. nerka*) на режим биогенных элементов // ДАН АН СССР. Т. 128. № 3. С. 626–627.

Крохин Е.М. 1967. Влияние размеров пропуска производителей красной на фосфатный режим нерестовых озер // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 57. С. 31–54.

Куренков И.И. 1975. Изменение биологической продуктивности озера под влиянием вулканического пеплопада // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск: Наука. С. 127–130.

Куренков И.И., Куренков С.И. 1988. Экспериментальная фертилизация озера Лиственничного // Проблемы фертилизации лососевых озер Кам-

чатки. Владивосток: Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. С. 8–20.

Лабораторный практикум по болезням рыб. 1983. М.: Лесная и пищевая пром-сть. С. 266.

Леванидова И.М., Леванидов В.Я. 1972. Бентос озера Азабачьего // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 82. С. 51–92.

Миловская Л.В., Уколова Т.К., Смирнов Б.П., Леская Е.В. 1990. Фертилизационный эффект в уровне первичного продуцирования экосистемы Курильского озера // Отчет. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. С. 15–29.

Проблемы фертилизации лососевых озер Камчатки. 1986. Владивосток: Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. 141 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР (Камчатка). 1973. Л.: Гидрометеиздат. Т. 20. С. 33–42.

Стравинская Е.А. 1980. Изменение гидрохимического режима озера за период исследований, в связи с хозяйственной деятельностью на водосборе // Эвтрофирование мезотрофного озера. Л.: Наука. С. 44–58.

Golowin, S., and H. Florczyk. 1983/84. Budget of nutrients and their real and useful loads in the lake Slawa water body // Environ. Prot. Eng. (PRL). Vol. 9. No. 4. P. 41–56.

Harvey, H.W. 1939. Substances controlling the growth of a diatom // J. Mar. Biol. Ass. U. K. Vol. 23. P. 499–520.

Ricker, W.T. 1954. Stock and recruitment // J. Fish. Res. Board Canada. Vol. 11. No. 5. P. 559–623.

Schindler, D.W. 1975. Whole-lake eutrophication experiments with phosphorus nitrogen and carbon // Intern. Verein. Limnology. Vol. 19. No. 4. P. 322–323.

Thienemann, A. 1930. Tropische Binnengewässler // Arch. für Hydrobiol. Suppl. VIII.

Vollenweider, R.A., and P.I. Dillon. 1974. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research // Nat. Res. Council Canada NRO Assoc. Comm. Sci. criteria. Environmental Quality NRCC. N 13690. 42 pp.