

ПРИРОДНАЯ СРЕДА

УДК 556.552.2:551.583
ББК 26.222.6

А. М. Догановский

УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ОЗЕР – ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Уровень воды в озере фиксирует запасы воды, во многом влияет на среду обитания биоценозов. Рассмотрены закономерности колебания уровней разнотипных озер, представленных как сложный коррелированный полициклический процесс. Выявлены факторы, определяющие параметры кривой распределения, которые связаны с изменением климатических условий и строением озерных систем. Выделены три типа колебаний уровней, различающихся автокоррелированностью. Установлены зависимости некоторых биоценозов от наполнений озер. Эффективность использования уровня как индикатора определена величиной отношения многолетней амплитуды уровня и средней глубины озер.

Введение

Озера – водоемы замедленного водообмена, распространены практически повсеместно. Эти водные объекты широко используются в хозяйственных целях. Особенно важными являются их водные и биологические ресурсы. Одновременно озера могут рассматриваться как индикаторы процессов, протекающих в их бассейнах, реагирующие на изменения климата и антропогенную деятельность. Вместе с водосбором одиночные озера образуют озерные системы, а несколько озер, соединенных между собой участками рек, – их разновидность – озерно-речные системы. Озерные системы различаются размерами, запасами воды, формами котловин и русел вытекающих рек, соотношением площадей бассейна и озера и другими показателями. Эти внешние признаки оказывают решающее влияние на структуру водного и теплового балансов, на интенсивность условного внешнего водообмена, на соотношение поступления в озеро аллохтонного и автохтонного вещества, а, следовательно, на тип озерной экосистемы. При этом в разных климатических условиях это влияние

различно, и механизм воздействия климата на экосистему регулируется озерной системой. Отдавая приоритет климату, можно отметить, что в общем случае от гумидного к аридному климату возрастает биопродуктивность озер, меняется уровень трофии. Например, для условий России биомасса зоопланктона возрастает от 1,45 г/м³ в лесной зоне до 12,6 г/м³ в степной. В этом же направлении увеличивается и рыбопродуктивность озер¹ и меняются их типы (сточные, периодически сточные и бессточные). Тем не менее, в одинаковых климатических условиях существенные различия в биотической части экосистем как раз и объясняются особенностями строения озерных систем. Например, биопродуктивность озера Ильмень в 15 раз выше, чем Онежского озера. Эти озера различаются глубиной, следовательно, прогреваемостью, интенсивностью внешнего водообмена. Различна биопродукция на близкорасположенных степных озерах Большие Чаны и Кулундинское, различающихся минерализацией. Уровень зарастания озер высшей водной растительностью зависит от глубины водоемов, наличия литорали и т. п.

В многолетнем разрезе климат не остается постоянным – меняются соотношение тепла и влаги, характеристики озерных систем и, следовательно, экосистем вплоть до их полной перестройки. Особенностью естественных изменений климата является повторяемость процессов; засушливые периоды сменяются увлажненными, вспышки массового увеличения биопродуктивности сменяются их сокращением². При этом разные озерные системы неодинаково реагируют на общие климатические изменения.

Основной задачей данной работы является оценка, с точки зрения гидролога, возможных закономерностей изменения озерных биоценозов при многолетних изменениях климата через меняющуюся среду обитания. Предполагается, что «долговременная изменчивость среды обитания является не только фоном, на котором совершаются биологические процессы, но и важнейшим регулятором этих процессов»³.

Такая экспертная оценка представляется оправданной, так как гидрологическая изученность озерных систем значительно лучше, чем биологическая. К сожалению, период инструментальных наблюдений не превышает 100–150 лет.

Среда обитания биоценозов определяется большим количеством абиотических элементов, многие из которых взаимно зависимы, и учесть их подчас просто невозможно. Поэтому для экспертных оценок часто используют некие интегральные показатели, которые отражают комплекс процессов, происходящих в озере и наиболее хорошо изученных. В качестве таких показателей неоднократно использовались средние глубины, время полного водообмена, температура воды, индексы Карлсона и другие.

В качестве такого показателя предлагается принять уровень воды в озерах, который является реакцией на изменения климата и отражает особенности строения озерной системы.

Материалы и методы

Многолетнее изменение уровня Каспия явилось одной из причин снижения поголовья осетровых из-за уменьшения площадей мелководий в северной части озера. Многолетняя тенденция снижения уровня озера Большие

Чаны способствовала постепенному увеличению минерализации воды, созданию дискомфортных условий для некоторых популяций. В то же время возросла вероятность низкого стояния уровней зимой, сопровождающегося заморами рыбы. Многолетнее падение уровней многих озер стран Балтии привело к их зарастанию, сопровождающемуся деградацией ранее существующих экосистем. За рассматриваемый период времени многие озера областей аридного климата исчезали полностью и вновь появлялись. Примеров, подтверждающих связь элементов биоценозов и уровней озер, много⁴.

Исследование уровня режима озер показало его большое разнообразие (различные тенденции, амплитуды, периоды стояния высоких и низких уровней и т.п.). Оценить эти различия можно, анализируя уравнение водного баланса (m^3):

$$W_{\text{пр}} + W_{\text{ос}} - W_{\text{ст}} - W_{\text{ис}} = \pm \Delta W, \quad (1)$$

где $W_{\text{пр}}$ – приток воды по рекам и подземным путем; $W_{\text{ос}}$ – атмосферные осадки на поверхность озера; $W_{\text{ст}}$ – сток из озера; $W_{\text{ис}}$ – испарение с поверхности озера; ΔW – приращение объемов. Для равновесного баланса $\Delta W = 0$.

Оценка структуры баланса сведена к установлению нелинейных связей между долей какой-либо составляющей в приходной или расходной его частях, климатическими показателями и характеристиками озерных систем (рис. 1). Из рисунка можно видеть, какие типы озер характерны для гумидного и аридного климата, и оценить, каким путем происходит водообмен.

Показатель условного внешнего водообмена может быть рассчитан так:

$$K_{\text{в}} = \frac{W_{\text{пр}}}{W_{\text{о}}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{о}}$ – объем воды в озере. Величина $K_{\text{в}}$ меняется в широких пределах. При $K_{\text{в}} > 100$ полный водообмен осуществляется за несколько суток; при $K_{\text{в}} < 1$ – за десятки и сотни лет. От интенсивности водообмена во многом зависят и гидрологический, и гидробиологический режим. При высоких значениях $K_{\text{в}}$ и большой доле речного стока большая часть поступающих с бассейна наносов, в том числе евтрофирующих веществ, транзитом проходит через озеро. При малых значениях $K_{\text{в}}$ и преобладании $W_{\text{ис}}$ наносы аккумулируются в нем. В известном уравнении Фолленвайдера при расчетах фосфорной нагрузки также учитывается показатель водообмена. Интенсивный водообмен способствует более резким колебаниям минерализации, ионного состава воды по годам и периодам увлажнения и т. п. От величины $K_{\text{в}}$ зависит и уровень режим.

В статье нет возможности остановиться на всех существующих подходах к анализу и расчетам многолетних колебаний уровней озер (стохастические, детерминированные и т. п.). Можно лишь отметить, что все подходы при изучении уровня режима озер предполагают определенную ритмичность процессов.

Уровеньный режим озер представляется как случайный коррелированный полициклический процесс, описываемый уравнением:

$$y(t) = m(t) + m'(t) + \varepsilon(t), \quad (3)$$

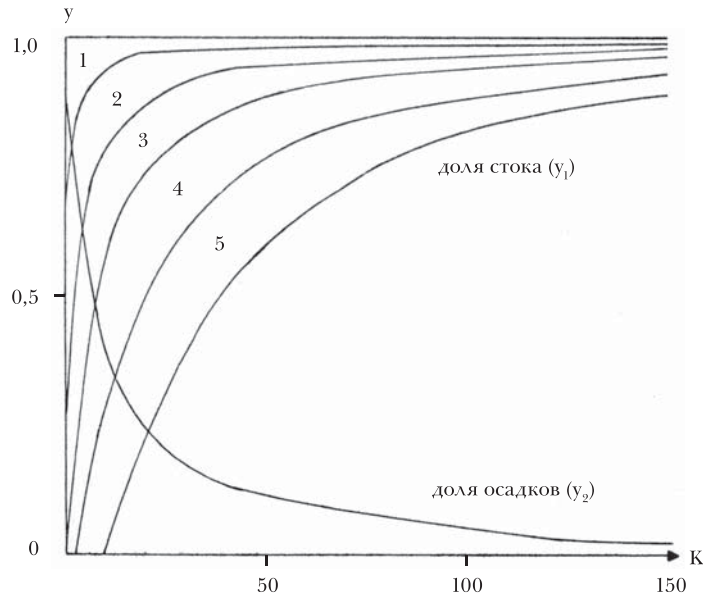


Рис. 1. Виды гипербол, характеризующих изменение доли составляющих водного баланса от определяющих факторов: y_1 – доля стока в расходной части баланса, y_2 – доля осадков в приходной части баланса, K – величина удельного водосбора, 1) модуль стока $q \sim 15$ л/(с·км²), 2) $q = 10$ л/(с·км²), 3) $q = 2-3$ л/(с·км²), 4) $q = 1$ л/(с·км²), 5) $q < 1$ л/(с·км²)

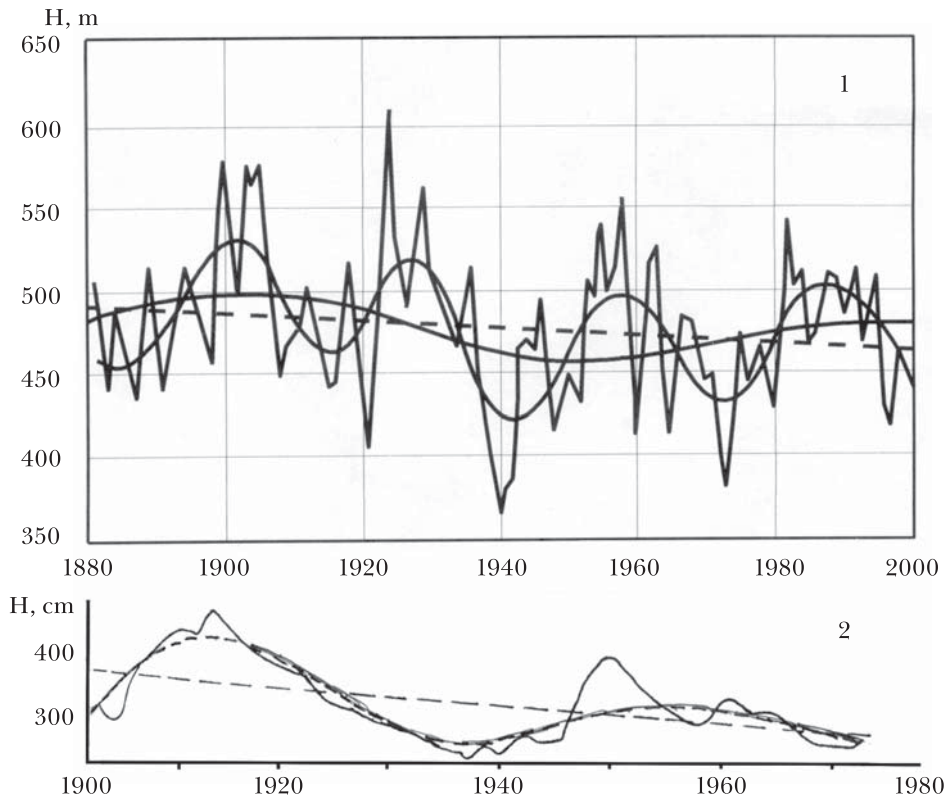


Рис. 2. Сглаженные ряды уровней озер: 1) Ладожское озеро, 2) озеро Большие Чаны

где $m(t)$ – медленно меняющаяся функция, переменное математическое ожидание; $m'(t)$ – стационарные случайные процессы с разным флуктуационным периодом; $\varepsilon(t)$ – составляющие «шума» с нулевым средним.

Для озерных систем различных климатических зон и в условиях меняющегося климата «вклад» каждой из составляющих различен и связан с автокоррелированностью процесса.

Из уравнения (1) установлена зависимость:

$$r(1) = 1 - \frac{K_B}{\varphi}, \quad (4)$$

где $r(1)$ – коэффициент автокорреляции, φ – параметр, зависящий от формы котловины (Φ) и русла вытекающей реки (отношение средней глубины к максимальной).

Заметно влияет на автокоррелированность рядов уровней наличие в бассейне других озер. Например, для озерно-речных систем Северо-Запада России получена формула:

$$r(1) = 0,24 \frac{f'_O}{q} + 0,18, \quad (5)$$

где q – модуль стока, средний для системы, л/(с·км²), f'_O – взвешенная озерность бассейна:

$$f'_O = \frac{1}{F_B^2} (F_{O1}F_{B1} + F_{O2}F_{B2} + \dots + F_{ON}F_{BN}), \quad (6)$$

где $F_{O1}, F_{O2}, \dots, F_{ON}$ – площади озер в цепочке; $F_{B1}, F_{B2}, \dots, F_{BN}$ – соответствующие им площади водосборов.

Наибольшие значения $r(1)$ характерны для крупных бессточных озер (Каспий – 0,98; Большие Чаны – 0,90; Балхаш – 0,92 и т. п.), наименьшие – для сильнопроточных (Ильмень – 0,4; Воже – 0,25 и т. п.). Величина внешнего водообмена также определяет и амплитуду колебаний уровней, что следует из известной формулы сложения дисперсий приходной (σ_1^2) и расходной (σ_2^2) составляющей водного баланса (мм):

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2r\sqrt{\sigma_1^2\sigma_2^2}, \quad (7)$$

где r – коэффициент корреляции между приходной и расходной составляющими водного баланса. Значения r связаны с $r(1)$:

$$r = \sqrt{1 - r(1)^2}, \quad (8)$$

Тогда уравнение (7) будет иметь вид:

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2\sqrt{1 - r(1)^2}. \quad (9)$$

Для озер в подавляющем большинстве случаев $r(1)$ заключено в пределах $0 \div 1,0$. Тогда при $r(1)=0$ $\sigma_{\Delta H}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2$, а при $r(1)=1$ $\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ ($\sigma_1^2 + \sigma_2^2 > (\sigma_1 - \sigma_2)^2$). Следовательно, амплитуда колебаний возрастает с уменьшением K_B при соответственно одинаковых σ_1^2 и σ_2^2 .

Коэффициент асимметрии рядов уровней (C_s) зависит в первую очередь от формы котловины и района расположения системы. Чем больше Φ , тем меньше C_s . Например, для озер ледниково-тектонического проис-

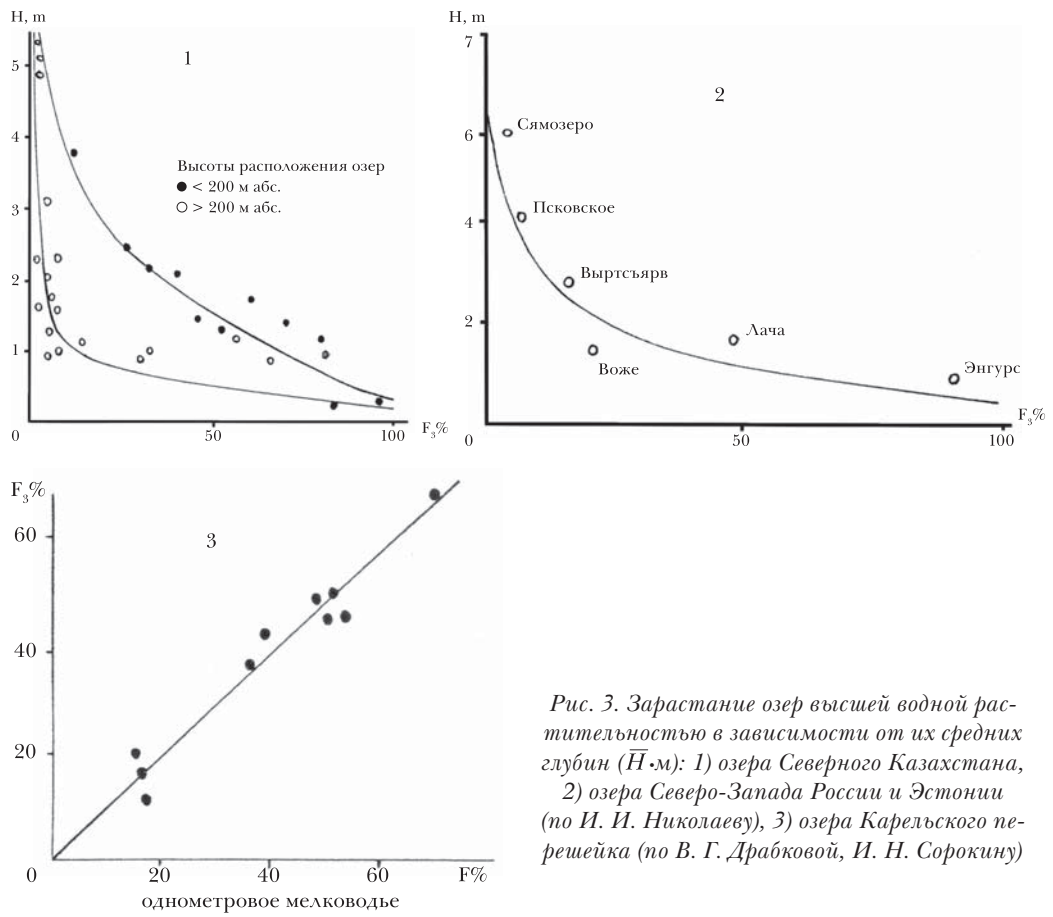


Рис. 3. Зарастание озер высшей водной растительностью в зависимости от их средней глубины (\bar{H} ·м): 1) озера Северного Казахстана, 2) озера Северо-Запада России и Эстонии (по И. И. Николаеву), 3) озера Карельского перешейка (по В. Г. Дробковой, И. Н. Сорокину)

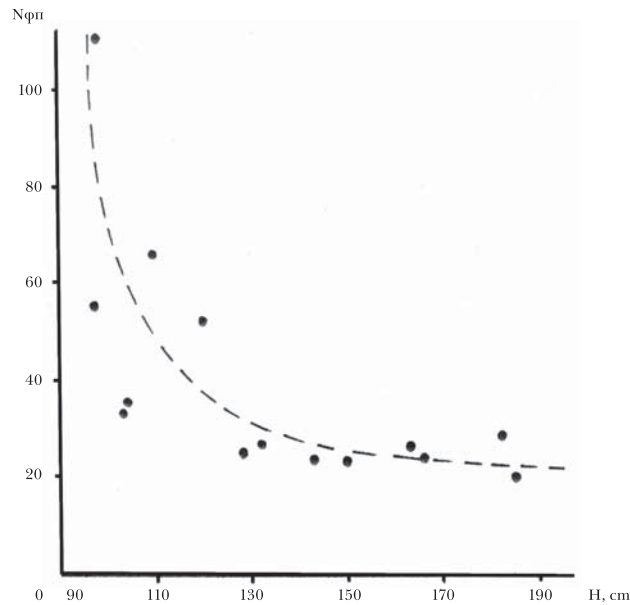


Рис. 4. Зависимость биомассы фитопланктона ($N_{ф.п.}$) от высоты стояния уровня для Чудско-Псковского озера (\bar{H} ·см) (по данным В. В. Ястремского)

хождения C_s изменяется от 1 при $\Phi=0,2$ до 0 при $\Phi=0,3$ и $C_s=-0,5$ при $\Phi=0,4$. Для мелководных озер юга России $C_s=1$ при $\Phi=0,5$, $C_s=0$ при $\Phi=0,65$, $C_s=-1$ при $\Phi=0,75$.

На основании проведенного анализа все озера по уровенному режиму можно условно разделить на три большие группы: сильнопроточные ($r(1)=0-0,5$); слабопроточные ($r(1)=0,5-0,8$) и бессточные ($r(1)>0,8$). В первом случае режим уровней озер близок режиму речного стока с преобладающей долей $\varepsilon(t)$. Во втором появляются значимые циклические флуктуации и тренды, в третьем формируются очень длинные периоды высокого и низкого стояния уровней – десятки и сотни лет – и тренды, создающие локальную нестационарность рядов и представляющие собой ветви подъема и спада циклов более высокого порядка.

На рис. 2 приведены графики многолетних колебаний уровней разнотипных озер. Выявление составляющих уравнения (1) проведено с помощью частотного фильтра Поттера. Так на Ладожском озере отмечен слабый тренд, 28–30-летние флуктуации, на бессточном озере Большие Чаны значимый тренд и 40–42-летние флуктуации.

Обработка и анализ большого количества рядов уровней позволили установить синфазность колебаний одинаковой продолжительности. Чем ниже частоты, тем на большей территории наблюдается их совпадение. Для определения влияния климатических изменений на уровенный режим озер исследованы регрессионные модели. В качестве предикторов – характеристик климата – приняты годовые атмосферные осадки (P), или коэффициент

увлажнения $a = \frac{P}{t_{v-x}}$, или другие климатические индексы. Учитывая,

что различные озерные системы по-разному трансформируют климатические сигналы, выполнены функциональные преобразования предикторов в зависимости от типа озерной системы по уровенному режиму. Для озер первой группы высокие коэффициенты корреляции ($r>0,6$) получены без преобразования рядов предикторов (например, a). Для озер второй группы ряды a преобразованы путем скользящего или экспоненциального сглаживания. Для озер третьей группы предикторы представлены в виде разностной интегральной кривой. При этом для озер второй и третьей групп наблюдается запаздывание реакции озерной системы на климатические изменения, достигающие 2–3 лет, а это несет прогностические возможности.

Различные типы уровенного режима, как показано, зависящие от условного внешнего водообмена, определяют аккумулирующие возможности озер и определяют тип лимногенеза⁵. Озера первой группы по уровенному режиму чаще всего относятся к типу транзитных и транзитно-аккумулятивных с терригенным типом лимногенеза, то есть связанных в первую очередь с процессами, происходящими на водосборе. Вторая группа озер относится к аккумулятивно-транзитному типу со смешанным типом лимногенеза. Здесь повышается роль лимнических, внутриводоемных процессов, значение которых возрастает с уменьшением водообмена и доли W_{CT} . Третья группа озер ($W_{CT}=0$) относится к аккумулятивному типу с лимническим типом лимногенеза, связанным лишь с внутриводоемными процессами. Сюда же относятся и озера, имеющие сток, но с очень замедленным водообменом. Например, Байкал ($K_B=0,0026$).

Таким образом, многолетние колебания уровней формируют разнопериодные изменения среды обитания биоценозов. Меняются размеры мелководий, глубины, минерализация, количество фосфатов с водосбора, условия прогревания воды, продолжительность вегетационного периода. Продолжительность периодов высокого стояния уровней связана с увеличением увлажненности и, как правило, похолоданием и т. п. Исходя из этого, имеются физические основы для поисков связей элементов биоценозов с уровнями. Чаще всего такие зависимости имеют место лишь на уровне когерентности. Наиболее бесспорным является влияние уровня режима на сообщества микрофитов, связанных с мелководными участками, пригодными для вегетации (рис. 3). Установлены зависимости и с фитопланктоном. Колебания видового состава рыб в озере Большие Чаны зависит от изменения минерализации. Вообще ихтиофауна отличается большим разнообразием видового состава и его зависимость от уровней довольно сложная, необходимо учитывать продолжительность жизни, период созревания, местообитание, кормовую базу и т. п. Тем не менее, такие связи для целого ряда видов установлены⁶. При этом ряды были соответствующим образом осреднены, а в рядах уровней исключались составляющие $\varepsilon(t)$. Эффективность использования уровня для оценки состояния биоценоза возрастает с увеличением отношения многолетней амплитуды уровня (A) или σ^2 к средней глубине водоема (H). Например, эти отношения для озер в зоне гумидного климата равны: Ильмень – 0,7; Чудское – 0,2; Ладожское – 0,06; Онежское – 0,05. Для первых двух установлены более тесные зависимости от уровня планктонных сообществ и видового состава ихтиофауны (рис. 4).

Проведенный анализ и выполненные экспертные оценки связей элементов биоценоза с уровнем режимом позволяют судить о динамике экосистем однотипных неизученных объектов и оценить возможные тенденции изменения экосистем в будущем при заданных изменениях климата и соответственно режима наполнений озер.

¹ Студенецкий, С. А. Рыбохозяйственное использование озерного фонда страны // Изв. АН СССР. – Серия географическая. – 1977. – № 2.

² Максимов, А. А. Природные циклы (причины повторяемости экологических процессов). – Л., 1989. – 263 с.

³ Антонов, А. Е. Крупномасштабная изменчивость гидрологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. – Л., 1987. – 248 с.

⁴ Николаев, И. И. Водный режим озер как фактор их биологической продуктивности: на примере больших озер Северо-Запада СССР // Водные ресурсы. – 1976. – № 4. – С. 114–122; Николаев, И. И. Экологические последствия искусственных изменений водного режима озер и их прогностическое значение // Экология. – 1986. – № 3. – С. 27–35; Тюрин, П. В. Влияние климатических условий на периодические колебания запасов промысловых рыб в озерах Ладожском, Ильмене, Псковско-Чудском, Белом // Труды ВНИРО. – 1967. – Том XII.

⁵ Богданов, В. В. Зонально-региональные свойства лимногенеза и их роль в классификации и районировании озер // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. – Л., 1984. – С. 71–78.

⁶ Догановский, А. М. Закономерности колебаний уровней озер и их влияние на основные элементы режима водоемов // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. Т. 8. – Л., 1990. – С. 65; Догановский, А. М. Исследование возможностей оценки динамики биопродуктивности озер по ограниченному числу абиотических факторов / А. М. Догановский, Е. В. Иванова // Межвузовский сборник. Вып. 110. – СПб., 1991. – С. 86–93.