

В. Ю. Третьяков¹, В. А. Шелутко², Д. Е. Селезнев³

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АНСАМБЛЕЙ ВНЕШНИХ ДАННЫХ ПОСТУПЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Российская Федерация, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр-т, 98

³ ГБОУ лицей № 389 «Центр экологического образования» Кировского района Санкт-Петербурга, Российская Федерация, 198096, Санкт-Петербург, Кронштадтская ул., 7, литер А

Представлена методика формирования обобщённых рядов данных внутригодовой динамики концентраций биогенных элементов в речном стоке. Эти ряды необходимы в качестве внешних факторов при имитационном моделировании функционирования водных экосистем. Рассматриваются алгоритмы определения степени антропогенного влияния на содержание биогенных элементов в речном стоке и выделения природной составляющей в содержании биогенных элементов. Приводится методика выделения внутригодовых гидрологических фаз и отнесения данных мониторинга к определённым гидрологическим фазам, проверки гипотез принадлежности выборок к одним генеральным совокупностям. Библиогр. 3 назв. Ил. 2.

Ключевые слова: внутригодовая динамика природного содержания биогенных элементов в речном стоке, внутригодовая изменчивость уровня воды, статистический анализ, имитационное моделирование.

V. Yu. Tretyakov¹, V. A. Shelutko², D. E. Seleznev³

TECHNIQUE FOR BUILDING OF DATA ENSEMBLES OF BIOGENIC ELEMENTS INPUT FOR SIMULATION OF AQUATIC ECOSYSTEMS STATE AND FUNCTIONING

¹ St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Russian State Hydrometeorological University, 98, Malookhtinskiy pr., St. Petersburg, 195196, Russian Federation

³ State budget educational institution lyceum № 389 «Environmental Education Center» of Kirov district of St. Petersburg, Russian Federation, 198096, St. Petersburg, Kronstadt Street, Building 7, letter A

A technique for building of generalized intra-annual dynamics of biogenic elements concentrations in river run-off is presented. The dynamics is necessary as external factor for simulation of aquatic ecosystems functioning. Algorithms of determination of degree of anthropogenic influence upon the biogenic elements concentrations in river water and revealing of natural part of total biogenic run-off are considered. A method of intra-annual hydrological phases revealing and the data assignment to the phases is presented. Statistical analysis of the data statistical homogeneity is discussed.

Keywords: intra-annual dynamics of natural concentration of biogenic elements in river run-off, intra-annual dynamics of water level, statistical analysis, simulation.

Для определения экологически обоснованных норм антропогенного воздействия на водные экосистемы широко применяются различные формы компьютерного моделирования, включая имитационное, балльно-индексное, многопараметрическое и многокритериальное оценивание. Все перечисленные виды компьютерного моделирования способны давать информативные результаты лишь при использовании адекватных данных. Однако ввиду колоссального количества подвергающихся антропогенному воздействию водных экосистем невозможно комплексное исследование каждой из них. С другой стороны, применение универсаль-

ной системы ПДК не учитывает специфики экосистем и возможности накопления токсических загрязняющих веществ в звеньях биоценозов и донных отложениях.

Выход, на наш взгляд, может обеспечить следующий алгоритм. С некоторой долей условности все поступающие в окружающую среду продукты деятельности человечества можно разделить на вещества тотально-экологического и индивидуально-токсического воздействия. Первые не оказывают влияния непосредственно на физиологические процессы в организмах, по крайней мере при образующихся в среде концентрациях. Однако они способны кардинально изменять протекание биогеохимических циклов в экосистемах, что может приводить к смене структур биоценозов. Подобным процессом является антропогенное эвтрофирование из-за дополнительного поступления соединений фосфора и азота с сельскохозяйственных территорий, животноводческих комплексов, населённых пунктов. Вещества индивидуально-токсического воздействия влияют непосредственно на организмы гидробионтов и поступают в составе стоков промышленных предприятий, гербицидов, пестицидов, инсектицидов, переходящих из атмосферы в водные экосистемы продуктов атмосферных выбросов предприятий и выхлопных газов автотранспорта. Таким образом, для оценки существующего и ожидаемого в будущем состояния водных экологических систем необходимо определение концентраций азота и фосфора, и токсикантов.

Все промышленные предприятия обязаны представлять корректные сведения о составе и объёмах стоков и атмосферных выбросов, поэтому в случае адекватности данных реальности концентрации токсикантов могут рассчитываться с необходимой степенью точности с помощью апробированных моделей распространения примесей в сплошной среде. Часть токсикантов может поступать также из воздушной среды на поверхность водосборов с атмосферными осадками и затем в водные экосистемы в составе почвенно-поверхностного и подземного стока. Для расчётов в этом случае также существуют апробированные модели переноса субстанций.

Интенсивности антропогенного поступления соединений азота и фосфора от распределённых и точечных источников также могут определяться с помощью апробированных моделей [1, 2]. Однако антропогенное поступление биогенных элементов накладывается на природное поступление. И антропогенное, и природное поступления биогенных элементов имеют свои собственные внутригодовые динамики. Если внутригодовая динамика антропогенного поступления биогенных элементов в первую очередь определяется графиком внесения удобрений и проведения сельскохозяйственных работ, с учётом межгодовой изменчивости погодных условий, то внутригодовая динамика природного поступления определяется строением водосбора и внутригодовыми циклами функционирования экосистем водосбора, разумеется также подверженными воздействиям межгодовой изменчивости погоды. Необходимо подчеркнуть, что именно к внутригодовой динамике природного поступления биогенных элементов приспособлены водные экосистемы в их естественном состоянии.

Поэтому очевидно, что для адекватного прогнозирования состояния водных экосистем с помощью компьютерного моделирования необходимо иметь информацию о внутригодовой динамике природного содержания биогенных элементов в речном стоке, формируемом на водосборах, занятых характерными естественными

ландшафтами. Для этого разумно использовать информацию, накопленную за длительный период наблюдений за химическим составом речного стока и уровнем воды на постах Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Разумеется, практически невозможно выделить речные створы мониторинга, у которых частные водосборы выше по течению совершенно не подвергались бы антропогенному воздействию. Тем не менее можно выделить бассейны с минимальным антропогенным воздействием, химический состав формируемого речного стока на которых отражает природную внутригодовую изменчивость. Для анализа внутригодовой динамики содержания биогенных элементов в речном стоке следует отбирать посты мониторинга с длительным периодом наблюдений, отсутствием антропогенного регулирования стока и минимальной степенью антропогенного воздействия выше по течению. При отборе постов мониторинга — «кандидатов» необходим анализ справочных и картографических материалов. Так, из 115 створов мониторинга, расположенных в российской части водосборного бассейна Финского залива, нами было отобрано только 25 удовлетворяющих этим условиям постов на реках Асилан-Йоки, Березайке, Важине, Вале, Видлице, Воложке, Волчьей, Голоховке, Кумсе, Кунье, Лососинке, Мшаге, Немине, Пчевже, Пяльме, Святерке, Северке, Селезневке, Синеи, Сороти, Тигоде, Тохма-Йоки, Туксе, Унице, Шарье.

Далее необходимо удостовериться, что массив данных каждого из исследуемых створов однороден, т. е. не существует выраженного временного тренда концентраций биогенных элементов в стоке. Для этого необходимо рассчитать среднегодовые концентрации биогенных элементов с учётом неравномерности отбора проб в течение календарного года и различного числа отборов в разные годы. Полученная временная динамика среднегодовых концентраций анализируется с помощью метода интегральных кривых. Для этого строится график, на оси абсцисс которого откладываются годы, а по оси ординат — суммы среднегодовых значений концентраций. При этом значение для первого года периода мониторинга берётся равным самой среднегодовой концентрации, для второго года — сумме среднегодовых значений первого и второго года и т. д. Если на интегральной кривой отсутствуют изломы и перегибы, это свидетельствует об отсутствии кардинальных изменений концентраций в течение рассматриваемого периода. Присутствие на интегральной кривой изломов необязательно говорит о кардинальном изменении концентраций. Подобные изломы могут быть обусловлены выбросами среднегодовых значений. В свою очередь, эти выбросы, возможно, являются следствиями отборов проб в эти годы только в периоды половодий с высокими значениями концентраций. Именно такой феномен был обнаружен нами при анализе межгодовой изменчивости среднегодовых концентраций в ряде рек. В случае наличия изломов все среднегодовые значения разбиваются на отдельные интервалы, границы между которыми соответствуют изломам на интегральной кривой. Соответствующие выделенным интервалам наборы значений сравниваются с помощью критериев однородности. Если нулевая гипотеза о принадлежности наборов значений к одной генеральной совокупности не опровергается, то можно говорить об отсутствии выраженного тренда концентраций и весь исследуемый период мониторинга может рассматриваться в качестве единого однородного массива данных.

На следующей стадии анализа определяется доля природной составляющей в речном стоке биогенных элементов. Для этого следует использовать ряд

методик — В. В. Бульона, Г. Т. Фрумина, Цобриста-Дейвиса; сравнить концентрации в речном стоке по данным мониторинга с фоновыми характеристиками; сравнить рассчитанные по данным мониторинга среднегодовые концентрации в реках со значениями, рассчитанными на основании модулей стока биогенов с природных территорий и суммарных значений стока. Весьма информативно также сравнение рассчитанных по результатам мониторинга среднегодовых концентраций общего фосфора со значениями, полученными на основании зависимости концентрации фосфора в речном стоке от лесистости водосбора [1]. Если различия незначительны, то это свидетельствует об отсутствии заметного воздействия точечных антропогенных источников биогенных элементов. В работе Г. К. Осипова [2] приводится таблица относительной интенсивности выноса фосфора с различных типов естественных и сельскохозяйственных территорий водосбора реки Паши в течение года по календарным месяцам. Для определения того, к какому типу внутригодовой изменчивости концентраций относится исследуемый створ, следует рассчитать средние месячные концентрации фосфора и расходы воды. Затем на основании этих данных строится относительная внутригодовая динамика выноса фосфора. Очевидно, для корректности сравнения этой динамики с данными для водосбора реки Паши следует принимать во внимание средний сдвиг во времени между наступлением фенологических фаз на водосборе реки Паши и частном водосборе исследуемой реки. Если этот сдвиг превышает две недели, то следует «сдвинуть в соответствующую сторону» созданный временной ряд относительной интенсивности выноса и уже его сравнивать с данными по водосбору Паши. Естественно, данный метод проверки можно рассматривать лишь в качестве «косвенного доказательства». Другой дополнительный способ определения степени естественности внутригодовой динамики содержания биогенов в речном стоке «от противного» заключается в исследовании с помощью критериев однородности гипотезы о принадлежности концентраций биогенных элементов в исследуемой реке и в реке, находящейся под явным антропогенным воздействием, к одной генеральной совокупности. Если гипотеза не опровергается, то это свидетельствует о значительном вкладе антропогенных источников в формирование внутригодовой изменчивости содержания биогенных элементов. Конечно, противоположный результат не доказывает чисто природный характер внутригодовой динамики биогенов, так как антропогенный вклад в содержание биогенов может быть существенным, но отличающимся по степени от антропогенного влияния на сток биогенов в реке с явным воздействием.

Дополнительный механизм проверки степени антропогенного нарушения содержания в стоке азота и фосфора состоит в проверке наличия взаимосвязи между поступлением минеральных удобрений в народное хозяйство и концентрациями биогенных элементов в речном стоке. Для этого следует проанализировать с помощью метода интегральных кривых динамику среднегодовых концентраций биогенов в речном стоке и поступления удобрений в народное хозяйство. Разумеется, довольно сложно найти сведения по объёмам удобрений, внесённых именно на территориях конкретных водосборных бассейнов. Однако при анализе данных за 50–80-е гг. XX в., учитывая плановый характер советской экономики, вполне обоснованно предположение об единообразии динамики объёмов внесения удобрений для всей территории РСФСР. Совпадение или близкое расположение изломов

на интегральных кривых среднегодовых концентраций биогенов и объёмов внесения удобрений может свидетельствовать в пользу предположения об антропогенном изменении содержания биогенов в речном стоке. При этом изломы на кривых объёмов внесения удобрений должны предшествовать изломам на кривых концентраций биогенов. Для проверки наличия взаимосвязи следует также рассчитывать значение коэффициента парной корреляции между среднегодовыми концентрациями биогенов и объёмами поступления биогенов в данном и предыдущем годах. Низкие значения коэффициента говорят в пользу предположения об отсутствии антропогенного изменения концентраций биогенов за рассматриваемый период мониторинга.

Формальный анализ внутригодовой изменчивости содержания в речном стоке биогенных элементов по календарным интервалам — месяцам, декадам, неделям неинформативен, поскольку не связан с внутригодовым функционированием водных экосистем и экосистем водосборов. Из-за межгодовых погодных различий наступление фаз внутригодového развития экосистем может смещаться во времени. Поэтому для привязки данных мониторинга к естественным внутригодовым циклам экосистем следует оперировать фазами гидрологического цикла, поскольку внутригодová изменчивость расхода или уровня реки связана с особенностями протекания процессов на территории водосбора в данном году. Следовательно, для объективности анализа внутригодовой динамики содержания биогенов в речном стоке даты мониторинга следует относить к определённым гидрологическим фазам, например, половодью, межени. Очевидно, что перед определением особенностей внутригодовой динамики содержания биогенных элементов в речном стоке необходимо удостовериться, что за весь рассматриваемый период не произошло как кардинальных изменений объёмов годового стока, так и перераспределения объёмов стока внутри года. В противном случае совместный анализ всего массива данных за рассматриваемый период будет некорректен.

Для исследования межгодовой изменчивости объёмов стока рекомендуется применение метода интегральных кривых, который традиционно используется в гидрологии суши для выявления качественных изменений среднегодовых значений. В нашем случае логично использовать годовую сумму среднесуточных значений уровня воды, поскольку расходы рассчитываются по значениям уровней. Линейный вид интегрального графика свидетельствует об отсутствии кардинальных изменений суммарного годового стока и его выраженного тренда за исследуемый период. Стандартные критерии однородности не позволяют выявить возможные кардинальные изменения внутригодového хода водности: например, смещение максимума водности с весны на осень. Очевидно, что подобное смещение приводит к существенному изменению хода биогеохимических циклов в водных экосистемах. Поэтому прежде чем анализировать особенности внутригодовой изменчивости содержания биогенных элементов в речном стоке, необходимо убедиться в неизменности внутригодовой динамики уровня воды за исследуемый многолетний период мониторинга.

Для проверки этой гипотезы предлагается следующий алгоритм. Весь массив значений уровня воды на конкретном посту мониторинга распределяется по декадам внутри года. Так, в одну группу данных включаются все значения уровня воды, например с 1 по 10 января для всех рядов внутригодовой изменчивости, измерен-

ных на определённом гидрологическом посту. Естественно, в связи с неравным количеством дней в разных месяцах третья декада каждого месяца содержит 8 или 9 (февраль), 10 или 11 значений. Таким образом, всего создается 36 групп декадных данных. Далее каждая из этих групп разделяется на две подгруппы, содержащие соответственно значения, относящиеся к первой и второй половинам исследуемого многолетнего периода наблюдений. Затем выполняется проверка принадлежности к одной генеральной совокупности значений двух декадных подгрупп каждой группы данных, относящихся к разным половинам периода наблюдений. Проверка однородности может производиться в среде приложения MathCAD с применением критериев однородности Уилкоксона—Манна—Уитни и Зигеля—Тьюки. При подобной проверке изменчивости уровней исследованных рек в ряде случаев гипотеза о принадлежности к одной генеральной совокупности нами опровергалась по обоим критериям, в остальных случаях хотя бы один из критериев опровергал данную гипотезу.

Возник вопрос: свидетельствуют ли эти различия о кардинальном изменении внутригодовой динамики водности рек? Поэтому для анализа ее однородности были рассчитаны значения коэффициента парной корреляции. Необходимо подчеркнуть, что определялась не степень тесноты корреляционной связи между средними значениями в декадных подгруппах, а между квантилями, соответствующими 5, 50 и 95% обеспеченности. Таким образом, были проанализированы законы распределения значений уровня воды в декадных подгруппах и рассмотрены высокие, средние и низкие значения уровня воды в первую и вторую половины всего многолетнего периода мониторинга. Значения коэффициентов парной корреляции между значениями уровня 5% обеспеченности для всех исследуемых рек составили меньше 0,7. Это означает, что взаимосвязь между временем наступления высоких уровней воды в разные годы практически отсутствует [3], т. е. пики половодья или паводков относительно редко повторяются в одно и то же время, а имеет место существенная изменчивость времени высоких уровней воды. Для средних и малых значений уровня воды были обнаружены высокие значения коэффициента парной корреляции. Это доказывает, что за исследуемый период мониторинга не произошло кардинального внутригодового перераспределения объёма речного стока.

Следующий этап исследования состоит в выделении фаз гидрологических циклов на основании внутригодовых динамик уровней и/или расходов воды на постах мониторинга. Выделение гидрологических фаз может производиться с помощью специальной компьютерной программы, разработанной В. Ю. Третьяковым в среде создания приложений Delphi 6.0. На экран монитора в интерфейсе программы выводится график годовой динамики уровня или расхода воды из внешнего файла. Пользователь с помощью манипулятора «мышь» отмечает на экране окончание каждой присутствующей на графике гидрологической фазы, начало же каждой фазы определяется автоматически: начало первой фазы — 1 января, всех последующих — следующие за окончанием предыдущей фазы сутки. Результаты работы записываются в текстовый файл формата реляционной таблицы, содержащий индексы гидрологических фаз, их определения, время начала и окончания каждой фазы, измеренные количествами суток, прошедшими от начала года. Затем выполняется отнесение каждого срока мониторинга к определённой гидрологической фазе. Для этого файлы формата баз данных с результатами мониторинга экспортируют-

ся в файлы формата таблиц Microsoft Excel, в которых каждый срок мониторинга записывается в числовом формате, т. е. в формате номера суток после 31 декабря 1899 г. Подобным же образом в формат таблиц Microsoft Excel импортируются текстовые файлы, содержащие сроки гидрологических фаз: эти сроки также записываются в числовом формате. Далее непосредственное определение гидрологических фаз сроков мониторинга может выполняться либо в среде СУБД Microsoft Access, либо с помощью специально разработанных приложений в среде ГИС. В первом случае сначала в базу данных импортируются таблицы результатов мониторинга и сроков гидрологических фаз, а затем создаётся декартово произведение двух таблиц: каждая строка первой таблицы повторяется столько раз, сколько строк во второй таблице, и в них последовательно добавляется содержимое строк второй таблицы. Затем к этой таблице применяется запрос с условием попадания срока мониторинга во временной интервал гидрологической фазы. Результаты запросов экспортируются во внешние файлы реляционных баз данных.

После того как все результаты мониторинга распределены по гидрологическим фазам, с помощью методов статистического анализа проверяются следующие гипотезы: концентрации биогенов, относящиеся к одной и той же фазе внутригодового гидрологического цикла у рек одной группы, принадлежат к одной генеральной совокупности; содержание биогенов в разные гидрологические фазы рек одной группы имеет статистически значимые различия; концентрации биогенов в одни и те же гидрологические фазы в реках различных групп статистически значимо различаются.

При статистическом анализе следует определять верность проверки гипотез в процентах. Если гипотеза принадлежности двух выборок к одной генеральной совокупности не опровергается, то производится расчёт верности гипотезы с помощью специально разработанных рабочих областей (программ) приложения MathCAD. Для определения степени верности результата при использовании критерия Стьюдента выполняется цикл расчёта теоретического значения t -статистики при увеличении уровня значимости от 1%. Цикл продолжается до тех пор, пока модуль оценки t -статистики, полученный при выполнении критерия Стьюдента, остаётся меньшим или равным текущему теоретическому значению t -статистики, рассчитываемому при переменном уровне значимости. Конечное значение уровня значимости уменьшается на 1% и умножается на 2 для перехода к двухсторонней вероятности попадания в доверительный интервал. Это значение принимается в качестве показателя верности результата проверки нулевой гипотезы о принадлежности двух выборок к одной генеральной совокупности.

Аналогичным образом определяется верность результата применения критерия Фишера. Здесь цикл увеличения уровня значимости выполняется до тех пор, пока рассчитанное по данным эмпирических выборок значение статистики F остаётся меньшим или равным значению обратного кумулятивного распределения Фишера при текущем значении уровня значимости. При определении уровня надёжности результата применения критерия Уилкоксона—Манна—Уитни цикл увеличения уровня значимости завершается, если значение статистики U выходит за пределы доверительного интервала. Для расчёта верности применения критерия Зигеля—Тьюки уровень значимости увеличивается в цикле программы, пока абсолютное значение тестовой статистики Z не превышает ординату (квантиль) t

нормированного стандартного нормального распределения при текущем уровне значимости. Если гипотеза принадлежности двух выборок к одной генеральной совокупности опровергается, то верность различия выборок составляет $1-2\alpha$ (α — односторонний уровень значимости), т. е. при $\alpha = 5\%$ эта величина составляет 90%.

На данном этапе исследования должно быть установлено и доказано, что реки каждой группы обладают специфической внутригодовой динамикой содержания биогенных элементов в речном стоке, т. е. значения, относящиеся к определённой фазе внутригодового гидрологического цикла рек одной группы, принадлежат к одной генеральной совокупности; между значениями, относящимися к различным гидрологическим фазам рек одной группы, существуют статистически значимые различия; между значениями, относящимися к одним и тем же гидрологическим фазам рек разных групп, также есть статистически значимые различия. В случае соблюдения этих требований для каждой группы рек обобщённые внутригодовые динамики содержания биогенных элементов в речном стоке будут отражать объективно существующие особенности функционирования систем «водосбор—водоток». В противном случае следует пересмотреть распределение створов мониторинга по группам.

На следующем этапе выполняется анализ временной изменчивости гидрологических фаз: определяются статистические параметры дат их начала, середины и окончания. Исследуется также повторяемость фаз: например, встречаются годы, когда осенний паводок не выражен и летняя межень смыкается с осенней. Анализ внутригодовых динамик уровня исследованных рек показал: период спада от начала календарного года до зимнего минимума встречается не более чем в 65% случаев; фаза от зимнего минимума до начала половодья — в 63% случаев; фаза от начала половодья до его пика — в 95%; фаза от пика половодья до его окончания — в 95%; летняя межень — в 82%; фаза от начала летнего паводка до его пика — в 86%; фаза от пика летнего паводка до его окончания — в 86%; фаза от начала осеннего паводка до его пика — в 76%; фаза от пика осеннего паводка до его окончания — в 76%, осенняя межень — в 64%; подъем уровня в конце года — в 58% случаев. Поэтому для анализа функционирования экосистемы водного объекта может возникнуть необходимость расчёта не одной обобщённой внутригодовой динамики содержания биогенного элемента в речном стоке, а нескольких подобных динамик, отражающих динамики при разных типах режима уровня. В любом случае средняя концентрация биогенного элемента для гидрологической фазы относится к осреднённой дате её середины. Для определения доверительного интервала обобщённой внутригодовой динамики концентрации биогенного элемента для каждой гидрологической фазы определяются значения средней концентрации плюс-минус среднее квадратичное отклонение (СКО). Концентрации биогенного элемента, верхняя и нижняя границы доверительного интервала между датами середин гидрологических фаз определяются методом численной интерполяции в среде приложения MathCAD. Пример обобщённой внутригодовой динамики содержания азота нитритов в водах рек первой группы (Кумсы, Немины, Пяльмы, Тохма-Йоки, Уницы) приведён на рис. 1.

Если можно пренебречь антропогенной составляющей стока биогенных элементов, то полученная внутригодовая динамика может использоваться для имитационного моделирования функционирования водных экосистем без антропоген-

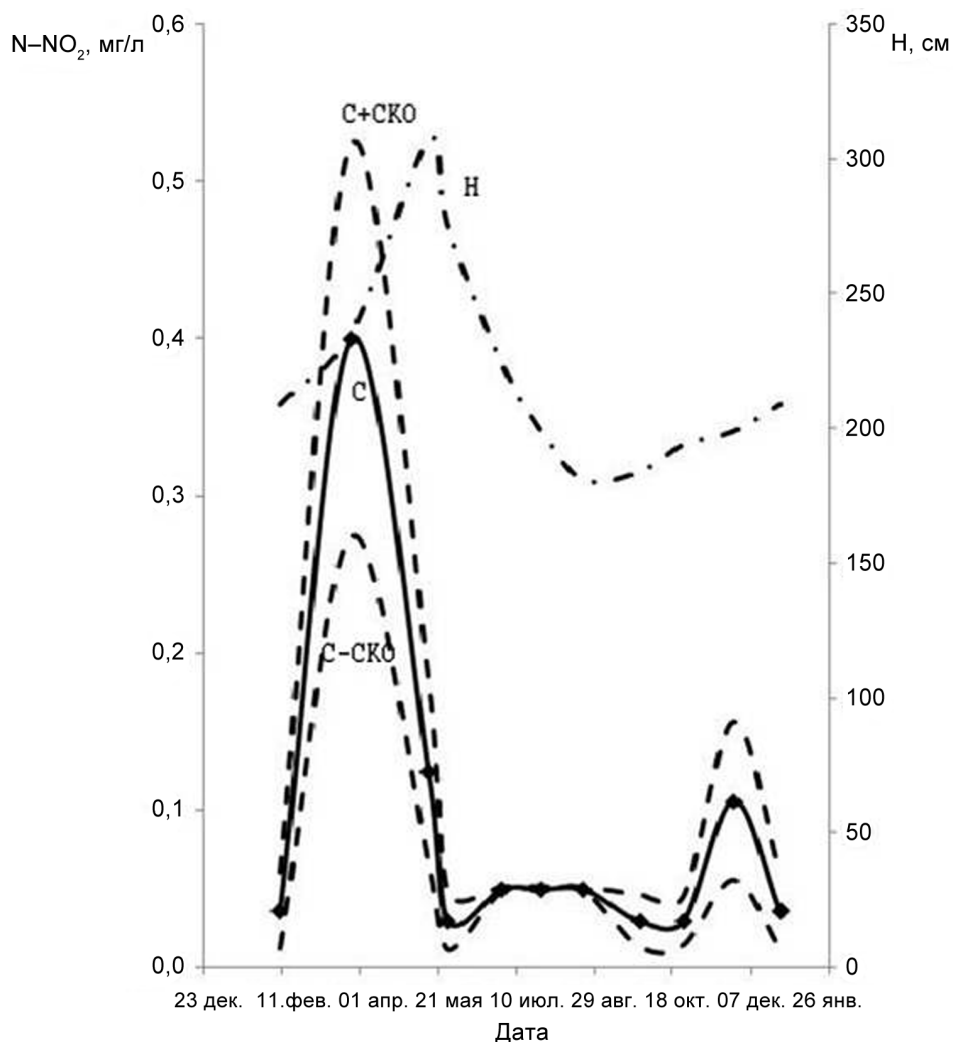


Рис. 1. Пример естественной внутригодовой динамики хода биогенных элементов (средняя концентрация азота нитритов \pm СКО в реках первой группы)

ного воздействия. В случае явного присутствия в стоке биогенов антропогенной составляющей, не превосходящей в среднем за год величины природного фона, построение ориентировочной естественной внутригодовой динамики выполняется следующим образом. Для бассейна водосбора рассчитывается внутригодовая динамика относительной интенсивности антропогенного поступления биогенов, т. е. последовательность из 365 чисел, показывающих, какая доля от суммарного за год антропогенного поступления этого соединения биогенного элемента приходится на данные сутки. Разумеется, сумма всех этих чисел должна быть равна 1, а средняя за год величина этого показателя — $1/365$. Определяется отношение суммарного за год антропогенного поступления биогенного элемента в данной форме к его природному поступлению, и на его основе рассчитывается среднегодовая доля

вещества антропогенного происхождения в его общей концентрации. Для каждого суток рассчитывается отношение текущей доли от суммарного годового антропогенного поступления данного соединения биогенного элемента к $1/365$, и результат умножается на среднегодовую антропогенную долю этого вещества в его общей концентрации. Полученный коэффициент представляет собой долю антропогенной части в общем содержании вещества для каждого суток. Умножением этого коэффициента на текущую концентрацию биогенного элемента для каждого суток определяется текущая величина антропогенной составляющей, которая вычитается из общей концентрации. Результат — природная концентрация биогенного элемента.

Имитационное моделирование функционирования экосистем проточных водоёмов и прибрежных морских акваторий кроме задания в качестве внешнего экологического фактора внутригодовой динамики концентраций биогенных элементов в поступающем речном стоке также требует и задания временного хода уровня воды во впадающей реке, поскольку на его основании рассчитывается изменение концентраций в водоёме из-за перемешивания с поступающими речными водами. Расчеты обобщённой внутригодовой динамики уровня воды для каждой группы рек выполняются следующим образом. Для любой входящей в определённую группу реки для каждого суток внутри года определяется среднее многолетнее значение уровня воды. По этим средним значениям строится средний многолетний ход уровня воды. Естественно, что каждый водомерный пост имеет свою индивидуальную отметку нуля поста. Поэтому в каждой группе рек выбирается река, нуль поста которой имеет самую низкую отметку в Балтийской системе высот. Для всех остальных рек группы определяется превышение отметок нулей постов над нулём этого самого низко расположенного поста. Эти превышения прибавляются к средним значениям уровней воды для каждого суток. Таким образом, для всех рек

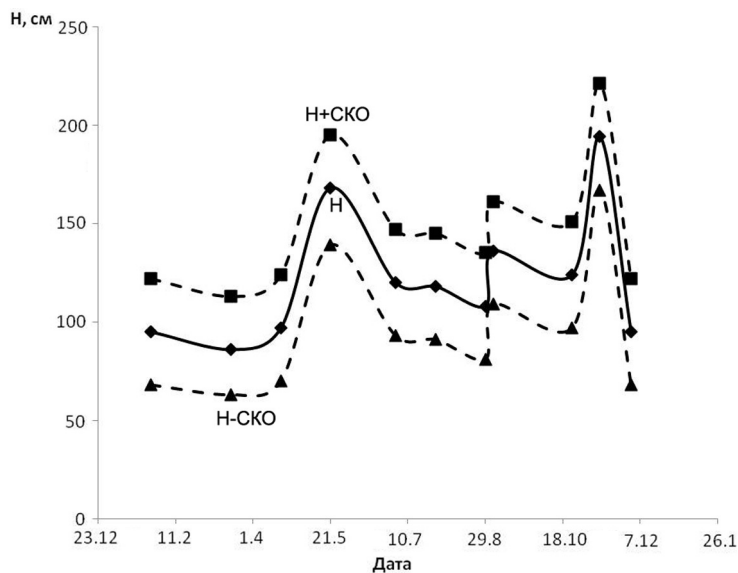


Рис. 2. Пример осредненной внутригодовой динамики уровня воды в реках первой группы с доверительным интервалом

группы на каждую дату внутри года определяются значения уровня воды в единой системе высот. Затем осреднённое значение уровня для всей группы рек на каждую дату определяется вычислением среднего по всем значениям уровня рек группы в эту же дату. Далее по этим осреднённым суточным значениям уровня строится осреднённая внутригодовая динамика уровня воды, характеризующая режим уровня воды для всей группы рек в целом. На рис. 2 представлен пример осредненного хода уровня воды.

Литература

1. Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб., 1993.
2. Осипов Г. К. Комплексная оценка и управление потоками биогенных веществ в природно-аграрных системах в связи с антропогенным эвтрофированием водоемов: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2004.
3. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб., 2008.

References

1. Khrisanov N. I., Osipov G. K. *Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov* [Management of reservoirs eutrophication]. St. Petersburg, 1993. 294 p. (In Russian)
2. Osipov G. K. *Kompleksnaia otsenka i upravlenie potokami biogennykh veshchestv v prirodno-agrarnykh sistemakh v sviazi s antropogennym evtrofirovaniem vodoemov*. Dis. dokt. geogr. nauk [Complex assessment and management of streams of biogenic substances into natural-agrarian systems with connection of reservoirs anthropogenic eutrophication]. St. Petersburg, 2004. (In Russian)
3. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii* [Statistical methods of hydrometeorological information analysis]. St. Petersburg, RSHU Publ., 2008. 405 p. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 26 марта 2015 г.

Контактная информация:

Третьяков Виктор Юрьевич — кандидат географических наук, доцент;
v_yu_tretyakov@mail.ru, v.tretyakov@spbu.ru

Шелутко Владислав Аркадьевич — доктор географических наук, профессор; shelutko@rshu.ru

Селезнев Денис Евгеньевич — магистр экологии и природопользования, методист;
catrine1980@mail.ru

Tretyakov V. Yu. — Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor; v_yu_tretyakov@mail.ru, v.tretyakov@spbu.ru

Shelutko V. A. — Doctor of Geographic Sciences, Professor; shelutko@rshu.ru

Seleznev D. E. — Master of Ecology and Environmental Sciences, methodist; catrine1980@mail.ru