

В. А. Шелутко^{1,2}, Нассер Отман¹, Е. С. Урусова¹

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СТОКА р. ВЕЛИКОЙ РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ АЗОТА

¹ ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет», Российская Федерация, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

² Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Университетская наб., 7/9

Учитывая особую важность процессов эвтрофирования, в работе авторы рассматривают процессы поступления соединений азота по р. Великой. Для этого необходимо оценить однородность рядов наблюдений и стационарность процессов изменения концентраций биогенов в речном стоке. Обычно в этих целях используются соответствующие методы, основанные, как правило, на статистических гипотезах. В последнее время выяснилось, что мощность этих критериев при имеющейся длине рядов наблюдений оказалась недостаточной. Поэтому в данном случае была предпринята попытка использовать в целях анализа интегральные кривые, в результате анализа которых получен ряд интересных выводов, касающихся изменений концентраций и объемов стока соединений азота по длине р. Великой и основных поставщиков этих соединений в реку. Библиогр. 6 назв. Ил. 4. Табл. 1.

Ключевые слова: река Великая, биогенное загрязнение, соединения азота, интегральные кривые, стационарность.

ESTIMATION OF THE NITROGEN CONTENT IN THE VELIKAYA RIVER WITH USING OF THE INTEGRAL CURVES.

V. A. Shelutko^{1,2}, Nasser Othman¹, E. S. Urusova¹

¹ Russian State Hydrometeorological University, 98, Malookhtinskiy pr., St. Petersburg, 195196, Russian Federation

² St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The process of nutrient compounds inflow along the Velikaya River is considered in this article taking into account the particular importance of eutrophication. For that it is necessary to estimate the homogeneity of the observation series and stationarity of the nutrient concentrations changes in the river flow. Methods based on statistical hypothesis are usually used for this estimation. Recently it has been established that capacity of these criteria is not enough for available observational series duration. Therefore in this case an effort was made to use integral curves in this analysis. As a result of integral curves analysis we arrived at interesting conclusions about changes of concentrations and quantity flow of nitrogen compounds along the Velikaya river and about main sources of these compounds for the river. Refs 6. Figs 4. Table 1.

Keywords: the Velikaya river, nutrient pollution, nitrogen compounds, integral curves, stationarity of the process.

Предпосылкой для принятия решений и согласования мер по управлению качеством воды в трансграничном Чудском озере является достаточно надежное информационное обеспечение. Особенно важной является информация о состоянии его притоков и направленности его изменения во времени. Учитывая особую важность процессов эвтрофирования, в данной работе авторы рассматривают процессы поступления соединений азота по р. Великой.

В природных водах азот находится в виде растворенных свободных молекул N₂, растворенных газообразных соединений NH₃, ионов минеральных соединений: аммонийных NH₄⁺, нитритных NO₂⁻ и нитратных NO₃⁻, а также многочисленных органических веществ. Азот относится к числу важнейших биогенных элементов,

концентрация его соединений во многом определяет биологическую продуктивность водного объекта. Поэтому общее содержание азотных соединений может служить одним из главных показателей потенциального эвтрофирования водных объектов [2].

Целью настоящей работы является анализ изменений содержания соединений азота и некоторых других показателей биогенного загрязнения речных вод во времени и по длине р. Великой и оценка степени влияния на это содержание городов и межгородских территорий.

Бассейн р. Великой составляет 25200 км² или 57% об общей водосборной площади Чудского озера. С р. Великой в Чудское озеро поступает более 60% азота и фосфора.

В качестве объектов исследования в работе использовались временные ряды средних годовых значений, рассчитанные по результатам наблюдений за концентрациями соединений азота (азот аммонийный — NH₄⁺, нитритный — NO₂⁻, нитратный — NO₃⁻) и других показателей биогенного загрязнения реки Великой (биохимическое потребление кислорода — БПК₅, кислород — O₂, железо — Fe) в трех городах: г. Опочка, г. Остров, г. Псков. В каждом городе наблюдения велись в двух створах: верхнем на входе р. Великой в город и нижнем — на выходе.

Регулярные наблюдения за отдельными характеристиками содержания биогенов в речных водах Великой производятся с 1967 г. За это время накопилось достаточное количество информации для суждения о характере изменений содержания биогенов, как за время интенсивного развития хозяйственных мероприятий в бассейне р. Великой в 70–80 годы, так и за время падения производства в девяностые годы XX в. Следует отметить, что временные ряды измеренных значений концентраций во всех речных створах являются достаточно сложными, так как, во-первых, в разные годы производилось разное число измерений и, во-вторых, в некоторые годы пробы на химанализ вообще не отбирались. Пропущенные данные при возможности восстанавливались по связи с аналогами, или в качестве пропущенных данных принимались средние многолетние данные.

Для достижения поставленной цели необходимо оценить однородность рядов наблюдений и стационарность процессов изменения концентраций биогенов в речном стоке. Обычно для этого используются соответствующие методы, основанные, как правило, на статистических гипотезах.

Следует отметить, что стационарность процессов (характеристика процессов) и однородность имеющихся рядов наблюдений (характеристика и процессов и качества наблюдений) контролируются в общем одинаковыми статистическими показателями, и различие их может констатироваться только на основе физического анализа. Так, для оценки стационарности и однородности по среднему значению и дисперсии часто используются критерии Стьюдента и Фишера [3]. В некоторых случаях нестационарность процесса может определяться наличием тренда. Для оценки наличия тренда обычно используется коэффициент корреляции значений рассматриваемого ряда X со временем или порядковым номером или критерий Спирмэна.

В последнее время выяснилось, что мощность этих критериев при имеющейся длине рядов наблюдений оказалась недостаточной в частности для суждения о наличии или отсутствии направленных постепенных изменений. В данном случае была предпринята попытка использовать в этих целях интегральные кривые.

Разностные интегральные кривые получили широкое распространение с тридцатых годов прошлого столетия, когда они активно начали использоваться в во-

дохозяйственных расчетах для многолетнего регулирования стока [4]. С выходом переводной монографии «Прикладная гидрология» [5] широкое распространение в целях анализа однородности получили интегральные кривые.

Интегральные кривые представляют собой графическое отображение зависимости (1):

$$W_j = f(j), \quad (1)$$

где: W_j — нарастающая сумма значений ряда Y от первого до j -го члена ряда ($j=1, 2, \dots, n$), то есть:

$$W_j = \sum_{i=1}^j y_i, \quad (2)$$

y_i — i -е значение ряда Y , i — порядковый номер значений Y , j — порядковый номер нарастающих сумм значений Y .

Как следует из формулы (2):

$$W_j = W_{j-1} + y_j. \quad (3)$$

Зная W_j , можно на каждый данный момент j определить среднее значение ряда Y от 1-го до j -го члена ряда включительно:

$$\bar{y}_1 = \frac{W_j}{j}. \quad (4)$$

Из определения интегральной кривой вытекают ее основные свойства, например, при анализе речного стока:

- каждая ордината кривой зависимости (1) характеризует объем стока через данный створ от начала наблюдений (или принятого начала) до j -го момента времени;
- разность ординат интегральной кривой при различных значениях аргумента j характеризует объем стока за интервал времени между этими значениями;

- при постоянном значении рассматриваемого элемента ($Y = \text{const}$) интегральная кривая представляет собой прямую линию;

- с увеличением j и возрастанием суммы W_j роль отдельных значений ряда Y в сумме W_j уменьшается, и поэтому отклонения отдельных точек от линии связи на графике уменьшаются, становятся все менее существенными. Поэтому (см. ниже) при $j \geq 5$ или 6, в крайнем случае 10, при однородности ряда наблюдений практически все точки графика зависимости (1) ложатся на прямую линию связи;

- вместе с тем, при наличии какой-либо тенденции в изменении рассматриваемых процессов, т. е. накоплении отклонений в ту или иную сторону, происходит изменение направления линии связи.

Именно исходя из этих свойств, в настоящее время интегральные кривые используются не только при расчетах регулирования стока, но и для выявления изменений тенденции развития процесса и времени начала этих изменений, то есть для определения переломных точек в многолетних колебаниях стока, если такие есть [3, 6]. Это позволяет выявить наличие тенденции в развитии процесса, даже если другими методами оценки однородности и стационарности она не выявляется.

Последнее определяется тем, что, как отмечалось выше, с увеличением j значимость отклонений средних значений в отдельные годы от средних многолетних значений в сумме W_j уменьшается и общий вид графика связи (1) определяется общей тенденцией нарастания суммы значений с увеличением периода наблюдений. Именно поэтому на интегральных кривых более четко прослеживаются изменения многолетних колебаний рассматриваемого процесса, вызванные, как правило, влиянием хозяйственной деятельности или, что также бывает, погрешностями измерений.

Интегральные кривые средних годовых концентраций для каждого соединения или показателя строились на отдельном рисунке. При этом на каждом рисунке совмещались данные по всем указанным выше 6 пунктам наблюдений на р. Великой от верховьев до низовья.

В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены совмещенные интегральные кривые средних годовых концентраций нитратного и аммонийного азота по каждому пункту наблюдений. На этих рисунках по оси абсцисс отложен год наблюдений, по оси ординат — сумма средних годовых концентраций от начала наблюдений.

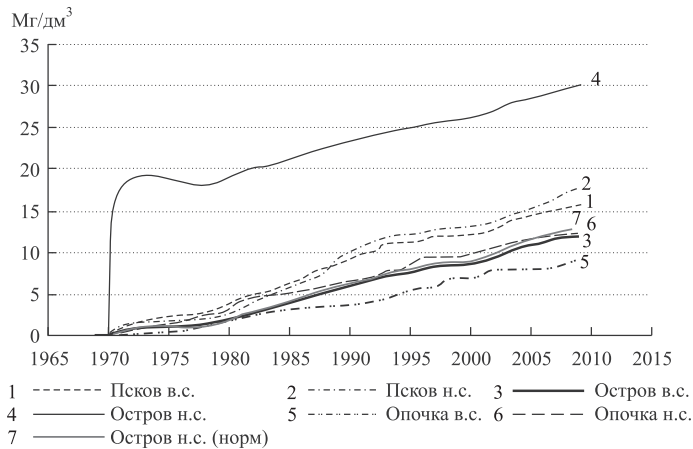


Рис. 1. Интегральные кривые значений концентраций нитратного азота

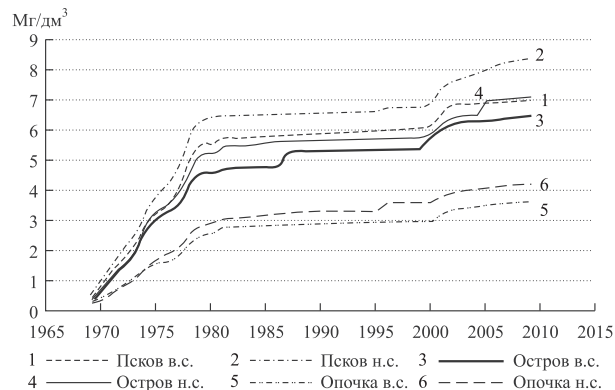


Рис. 2. Интегральные кривые значений концентраций аммонийного азота

При анализе представленных и других интегральных кривых концентраций выяснилось, что изменения интегральных кривых и переломные точки большинства рассматриваемых соединений и элементов достаточно хорошо согласуются между собой. Только в одном случае, а именно интегральная кривая концентраций стока азота нитратного в пункте Остров — нижний створ (см. рис. 1) отличается от интегральных кривых в других створах.

Это отличие определяется значением средней годовой концентрации только в самом начале периода наблюдений и не получило никакого отражения ни в верхнем (Остров — верхний створ), ни в нижнем по течению створе (Псков — верхний створ). Эти обстоятельства, а также сведения о невозможности городского хозяйства г. Остров поддерживать в течение года такой объем стока нитратов, позволили нам считать среднюю концентрацию и объем стока в этом году результатом ошибочных измерений или расчетов. Вместо этого значения было принято среднее многолетнее значение, считая, что среднее многолетнее значение меньше влияет на все последующие значения и конечный результат анализа. После этой поправки интегральная кривая азота нитратного в пункте Остров — нижний створ (пунктирная линия в поле графика) стала отражать общую тенденцию изменений интегральных кривых во всех пунктах наблюдений.

Следует отметить, что интегральные кривые средних годовых концентраций соединений азота на входе и выходе р. Великой из городов нередко пересекаются (см. рис. 1, 2), т. е. концентрации рассматриваемых веществ на вышележащих створах в ряде случаев превышают его концентрации в нижележащих створах. По-видимому, это связано с процессами самоочищения речных вод или с нарастающим разбавлением соединений вниз по реке Великая за счет увеличения расходов воды. Если более правильным является второе предположение, то очевидно, что поступающие воды (боковой приток) между соответствующими створами наблюдений должны быть более чистыми, чем основная масса воды, протекающей по р. Великой.

Для выяснения поставленного вопроса наряду с графиками интегральных кривых концентраций были построены графики интегральных кривых соединений азота, где по оси ординат откладывались суммы годовых объемов стока. В данном случае (рис. 3, 4) оказалось, что интегральные кривые объемов стока нигде не пересекаются, то есть вниз по длине р. Великой на всем протяжении происходит большее или меньшее увеличение годовых объемов стока загрязняющих веществ. Действительно, в г. Опочка (нижний створ) объем годового стока в течение всех лет больше, чем в верхнем; от Опочки (нижний створ) в течение всех лет происходит нарастание объемов стока до г. Остров (верхний створ) и т. д. Отсюда следует, что основной причиной уменьшения концентраций вниз по длине реки является разбавление речных вод более чистыми водами бокового притока.

На всех рассмотренных графиках интегральных кривых концентраций и объемов стока, за исключением БПК, четко прослеживаются изменения тенденции развития процессов стока рассмотренных веществ. Так, в г. Пскове и г. Острове в верхнем и в нижнем створах, то есть на входе и выходе р. Великой из этих городов, достаточно четко выражена общая тенденция уменьшения концентраций и объемов стока нитратного азота NO_3^- , начиная с 1980 г. по 2000 г. По-видимому, это уменьшение связано, во-первых, с борьбой за экономию, охватившую нашу страну в начале этого периода, а во-вторых, с кризисом конца восьмидесятых и всего периода девяно-

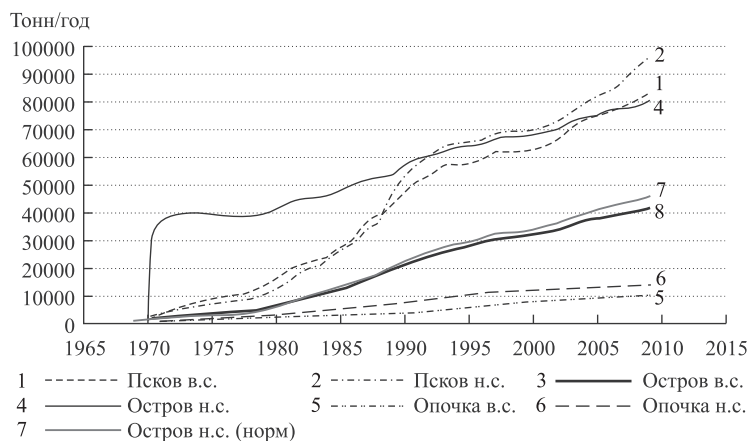


Рис. 3. Интегральные кривые значений объемов стока нитратного азота

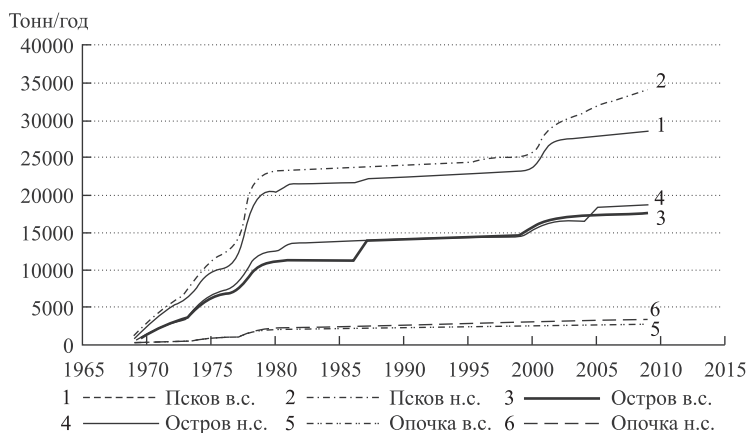


Рис. 4. Интегральные кривые значений объемов стока аммонийного азота

стых лет. В это время резко упало промышленное производство и практически прекратился вывоз минеральных удобрений на поля. Может быть, это связано также с общей бесхозяйственностью в нашей промышленности и в сельском хозяйстве, когда различные химические соединения и удобрения еще по инерции и существующим договорам завозились, а должных мер к их сохранению уже не предпринималось.

С 2000 г. концентрации и объемы стока рассматриваемых соединений и показателей несколько повысились, что, по-видимому, связано с некоторым оживлением промышленности и сельского хозяйства.

Интересно, что описанные выше тенденции почти не просматриваются в верховьях р. Великой у г. Опочка. По-видимому, это объясняется тем, что основные сельскохозяйственные поля здесь находятся ниже нижнего створа на р. Великой, и, следовательно уменьшение объемов вывоза удобрений на поля сказывается в меньшей степени. Не обладает город и развитым промышленным производством, связанным с химической промышленностью.

В других створах уменьшение концентраций и объемов стока рассматриваемых

веществ и показателей выражено в этот период менее значительно. Исключение представляют процессы изменения БПК во времени. По всем створам интегральные кривые представляют собой прямые линии, без каких-либо переломов в течение всего периода наблюдений. Как можно объяснить существенное уменьшение концентраций и объемов стока биогенов и неизменность этих характеристик БПК, пока не понятно.

Сток и приращение стока соединений биогенов, кислорода и БПК через отдельные створы по р. Великой

Город	Створ	Объем стока (тонн за период наблюдений)	Приращение (тонн за период наблюдений)	
Кислород				
Опочка	Верхний створ	421 552	-15 641	931 428
	Нижний створ	405 911		
Остров	Верхний створ	1 337 339	-2 517	635 212
	Нижний створ	1 334 822		
Псков	Верхний створ	1 970 034	-169 152	
	Нижний створ	1 800 882		
Аммонийный азот				
Опочка	Верхний створ	2 963	543	14 076
	Нижний створ	3 506		
Остров	Верхний створ	17 582	1 572	9 830
	Нижний створ	18 654		
Псков	Верхний створ	28 483	5 460	
	Нижний створ	33 943		
Нитритный азот				
Опочка	Верхний створ	154	294	158
	Нижний створ	448		
Остров	Верхний створ	606	278	264
	Нижний створ	884		
Псков	Верхний створ	1 148	954	
	Нижний створ	2 102		
Нитратный азот				
Опочка	Верхний створ	11 318	1 660	28 235
	Нижний створ	12 978		
Остров	Верхний створ	41 213	3 161	38 058
	Нижний створ	45 174		
Псков	Верхний створ	83 232	12 787	
	Нижний створ	96 019		
БПК				
Опочка	Верхний створ	70 263	17 420	120 715
	Нижний створ	87 683		
Остров	Верхний створ	208 398	45 928	132 165
	Нижний створ	254 326		
Псков	Верхний створ	386 491	43 563	
	Нижний створ	430 054		

В таблице представлены для всех шести створов р. Великой объемы стока рассмотренных веществ и приращения объемов стока между этими створами за весь период наблюдений. Почти во всех случаях основные приращения объемов стока соединений азота и других характеристик по длине р. Великой происходят вне городских территорий, причем величина этих приращений в три-четыре раза превышает приращения в городах (таблица).

То есть влияние городов, даже такого крупного как Псков, на формирование стока аммонийного и нитратного азота гораздо менее значительно, чем межгородских территорий.

Существенно отличаются от всех других показателей изменения по длине р. Великая кислорода и азота нитритного. Так, объем кислорода в р. Великой в пределах городских территорий не только не возрастает, но и существенно уменьшается. Причем уменьшение стока кислорода в пределах городской территории зависит от промышленного потенциала города. Так, если в пределах г. Опочка уменьшение составляет 15 641 тонну или 3,7% от объема кислорода, проходящего через верхний створ, то в Острове 2517 тонн, а в Пскове 169 152 тонны или 8,6%.

По-другому происходят и изменения азота нитритного. Здесь основные приращения объемов стока происходят в пределах городских территорий и особенно сильно в пределах г. Пскова, где объем нитритов возрастает почти в два раза. По-видимому, это связано с тем, что наличие нитритного азота во многом определяется дефицитом кислорода, который наблюдается во всех трех городах. Ниже городов происходит приращение растворенного кислорода, и нитриты частично окисляются до нитратов.

Выводы

1. Основными поставщиками аммонийного и нитратного азота в р. Великую являются межгородские территории, хорошо освоенные в сельскохозяйственном отношении; влияние городов, в том числе г. Пскова, по сравнению с ними незначительно.

2. Объемы стока рассмотренных форм азота и БПК₅ нарастают от истоков к устью от створа к створу. Нарастание концентраций выражено меньше вследствие разбавления при увеличении или уменьшении расходов воды.

3. Во многих случаях процессы изменения концентраций и объемов стока рассмотренных форм азота во времени являются не стационарными.

4. Направленность временных изменений химических загрязнений во многом определяется политикой и состоянием экономики государства. При этом, учитывая, что влияние городов в данном случае менее значительно, особенно большую роль играет развитие сельского хозяйства.

5. Интегральные кривые являются достаточно хорошим показателем состояния химического загрязнения рек и, по-видимому, должны обязательно использоваться при первичном анализе, особенно для выявления тех или иных существенных тенденций изменения.

Литература

1. *Никаноров А. М.* Гидрохимия. Л.: Гидрометеоиздат, 2001. 447 с
2. *Зенин А. А., Белоусов Н. В.* Гидрохимический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 239 с.
3. *Шелутко В. А.* Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 238 с.
4. *Бахтияров В. А.* Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 428 с.
5. *Линслей Р. К., Колер М. А., Паулюс Д. Л.* Прикладная гидрология. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 759 с.
6. *Шикломанов И. А.* Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 334 с.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2014 г.

Контактная информация

Шелутко Владислав Аркадиевич — доктор географических наук, профессор; shelutko@rshu.ru
Урусова Елена Сергеевна — кандидат географических наук, старший преподаватель;
e.s.urusova@gmail.com
Нассер Отман — аспирант; othmanas69@yahoo.com

Shelutko V. A. — Doctor of Geographic Sciences, Professor; shelutko@rshu.ru
Urusova E. S. — Candidate of Geographic Sciences, senior lecturer; e.s.urusova@gmail.com
Nasser Othman — post-graduate; othmanas69@yahoo.com