

УДК 556.535.8

**АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ Р. БОЛХОВЕЦ (ПРИТОКА Р. СЕВЕРСКИЙ ДОНЕЦ) <sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта № 02.740.11.0675 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

**М.Л. Прядко, П.В. Голушов,  
А.Г. Корнилов, С.Н.  
Колмыков, Л.Ю. Гордеев**

Белгородский государственный  
национальный  
исследовательский  
университет, Россия, 309015, г.  
Белгород, ул. Победы, 85  
E-mail: [Mariele0313@yandex.ru](mailto:Mariele0313@yandex.ru),  
[Golusov@bsu.edu.ru](mailto:Golusov@bsu.edu.ru), [Kornilov@bsu.edu.ru](mailto:Kornilov@bsu.edu.ru), [Kolmykov@bsu.edu.ru](mailto:Kolmykov@bsu.edu.ru),  
[GLEO89@yandex.ru](mailto:GLEO89@yandex.ru)

Рассмотрены особенности функционирования р. Болхолец как каскадной гидрохимической системы. Представлены результаты мониторинга показателей качества воды в различных по хозяйственному использованию территории водосбора участках. Методом кластерного анализа выявлены пространственные различия химического состава воды этих участков и основные фазы гидрохимического состояния реки во времени. Пространственно-временная организация реки как каскадной гидрохимической системы является реакцией на антропогенную трансформацию участков водосбора и должна быть учтена при планировании мониторинговых исследований и эколого-реабилитационных мероприятий.

Ключевые слова: малые реки, химическое загрязнение, гидрохимические каскадные системы, пространственно-временная изменчивость, кластерный анализ.

## Введение

В результате сложнейшей истории техногенеза, а также исторической дифференциации систем природопользования в бассейнах рек сформировались их специфические пространственная структура и динамика во времени, которые можно рассматривать как результат адаптации геосистем к техногенному воздействию. Такая трансформация отражается, в конечном итоге, в гидрохимических характеристиках потоковых структур поверхностного и речного стока. Это обуславливает актуальность исследования пространственно-временной динамики гидрохимических показателей качества вод [1]. Даже на протяжении сравнительно небольших бассейнов малых рек заметны существенные пространственные различия химического состава вод [2]. Существенные изменения претерпевает и динамика химических показателей во времени.

## Объект и методы исследования

Р. Болхолец, около 10 км русла которой (из 25 км общей протяженности) находится в черте г. Белгорода [3], на всем протяжении испытывает антропогенное влияние различного характера, влекущее за собой пространственно-временную изменчивость наиболее значимых в экологическом отношении гидрохимических компонентов.

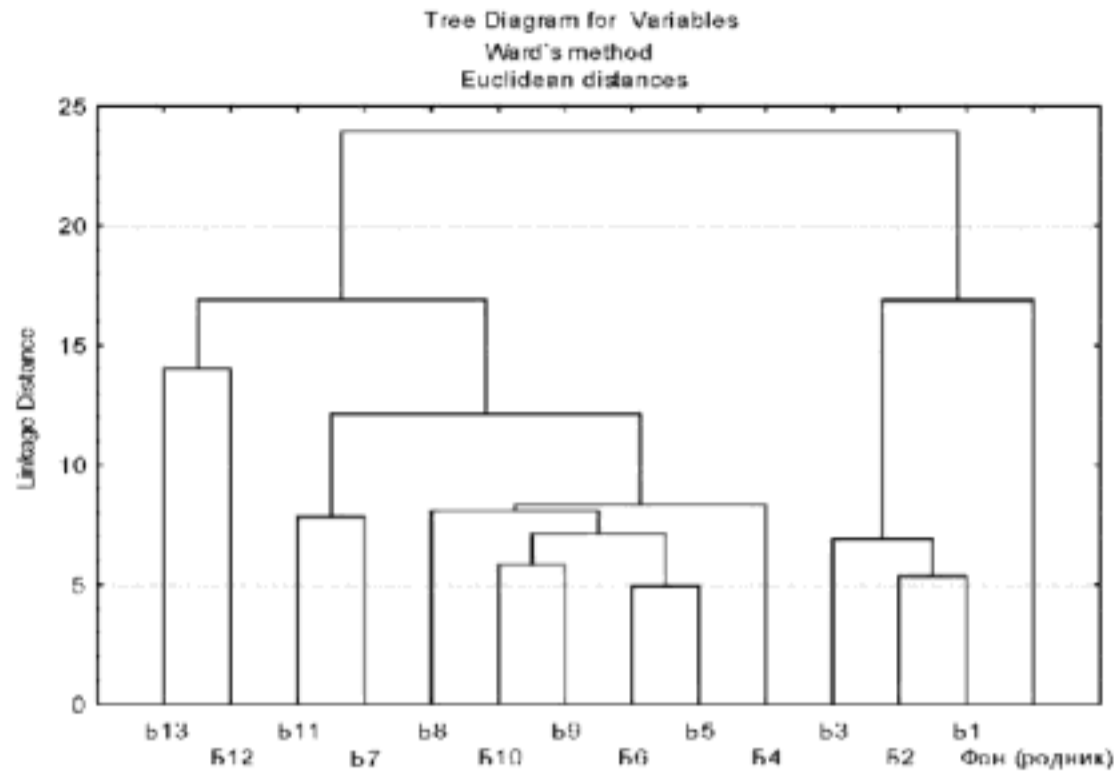
Для пространственного анализа гидрохимических показателей в реке целесообразно представить ее как каскадную систему, выделив в ней створы, условно обозначаемые как «вход» и «выход» систем. В р. Болхолец, на всем протяжении испытывающей влияние населенных пунктов, были выделены 14 точек пробоотбора, включая фоновый объект - родник в с. Пушкарное Белгородского района (см. рис. 1). Местоположения створов были обоснованы путем анализа геоэкологической ситуации в ее бассейне, а также с учетом антропогенных модификаций ее русла, произведенных в начале 1980-х годов, когда в его городском отрезке были произведены гидротехнические работы. В результате русло представляет собой каскад расширений с замедленным водообменом. Эти расширения выполняют противопаводковую функцию, а также принимают поверхностный сток с городской части бассейна, способствуют осаждению взвешенных частиц, т.е. представляют собой природно-техногенные «очистные сооружения».

В течение года (с февраля 2011 г. по январь 2012 г.) для оценки эколого- гидрохимического состояния р. Болхолец проводился регулярный (ежемесячный) отбор проб, которые анализировались с использованием стандартных методик по следующим показателям: pH (потенциометрическим методом), минерализация (методом кондуктометрии), азот аммонийный (спектрофотометрическим методом), нитраты и нитриты (потенциометрическим методом), железо общее (спектрофотометрическим методом), а также содержание ионов свинца, меди и цинка (методом вольтамперометрического анализа) в контрольных створах, определяющих состояние отдельных участков реки. Общее количество проанализированных проб - 168. В день пробоотбора проводился анализ воды на pH, минерализацию, содержание азота аммонийного, нитратов и нитритов. Для вольтамперометрического (на определение содержания свинца, меди и цинка) и спектрофотометрического анализа (на определение содержания железа общего) пробы воды консервировались добавлением концентрированной азотной кислоты (2 : 500 мл).

Картирование фрагмента бассейна р. Болхолец с обозначением точек пробоотбора осуществлялось с использованием компьютерной программы MapInfo 10.0.1.

Для выявления пространственных и временных различий химического состава речной воды использовали кластерный анализ (программа STATISTICA 6.0). Для этого все данные были нормированы (отношение отклонений от среднего значения к стандартному отклонению). Для более четкого выделения кластеров использовали метод Уорда, который позволяет «расширять» признаковое пространство [4].

**Результаты и обсуждение** Выделение большого количества контрольных створов (в системе мониторинга поверхностных вод Росгидромета на р. Болхолец предусмотрен лишь один пост) позволило выявить пространственные различия гидрохимических характеристик участков р. Болхолец. Методом кластерного анализа были обработаны нормированные данные гидрохимических исследований за период наблюдений с февраля 2011 г. по январь 2012 г. (рис. 2).



*Рис. 2.* Результат кластер-анализа массивов гидрохимических данных, сгруппированных по точкам отбора проб

На р. Болховец можно выделить три каскадные системы, различающиеся гидрохимическими показателями:

- 1) начальная, соответствующая участку бассейна с сельским типом расселения (створы Б1-Б3);
- 2) центральная, с городским типом застройки (створы Б4-Б11);
- 3) устьевая, вблизи впадения в р. Северский Донец (створы Б12-Б13).



v>

**Условные обозначения**

- река
- расширение русла

ОБ1 створы

древесно-кустарниковая растительность

луговая растительность поля

огороды

**Кварталы**

-  многоэтажная застройка
-  многоэтажная застройка
-  промышленная застройка

Рис. 1. Расположение точек пробоотбора воды в р. Болховец

500 1000

При этом наиболее значимые различия наблюдаются между «сельской» и «городской» гидрохимическими системами. Различия по совокупности гидрохимических показателей между этими каскадными системами заключаются, прежде всего, в характере застройки территории бассейна («сельский» и «городской» тип) и, как следствие, в уровне использования территории и антропогенного воздействия на водосбор. Кроме того, эти отличия могут быть связаны с тем, что при переходе из начальной в центральную систему водосбора происходит резкая трансформация русла р. Болховец, которое в «городском» типе застройки представлено каскадом техногенных водоемов - расширений и углублений русла. Такая неоднородная морфология русла определяет неравномерную скорость течения реки и, как следствие, различия в процессах, в которых участвуют гидрохимические компоненты.

Для анализа временной изменчивости гидрохимических показателей целесообразно соотнести полученные за весь период наблюдения данные с различными фазами гидрологического режима исследуемой реки. В результате проведения кластерного анализа для р. Болховец выделено 3 сезона, существенно различающихся по химическому составу речной воды (рис. 3): зимний, весенне-летний и летне-осенний.

Различия между этими сезонами обусловлены, прежде всего, разновременностью поступления поверхностного стока и различиями его интенсивности в разные сезоны года. Поверхностный сток, особенно дождевые воды, характеризуются резкой неравномерностью расходов. В сравнительно короткий промежуток времени расход и объем дождевых вод могут резко возрасти, поэтому в течение года с поверхностным стоком в водоем поступает огромное количество взвешенных веществ [5]. С учетом антропогенного воздействия на водосбор, временная динамика гидрохимического состояния реки, таким образом, упрощается, в следствие сокращения фаз (нами выделено три кластера), и становится зависимой от кратковременных режимов типа дождевых паводков. Таким образом, пространственная структура усложняется, а временная - упрощается и становится более хаотичной.

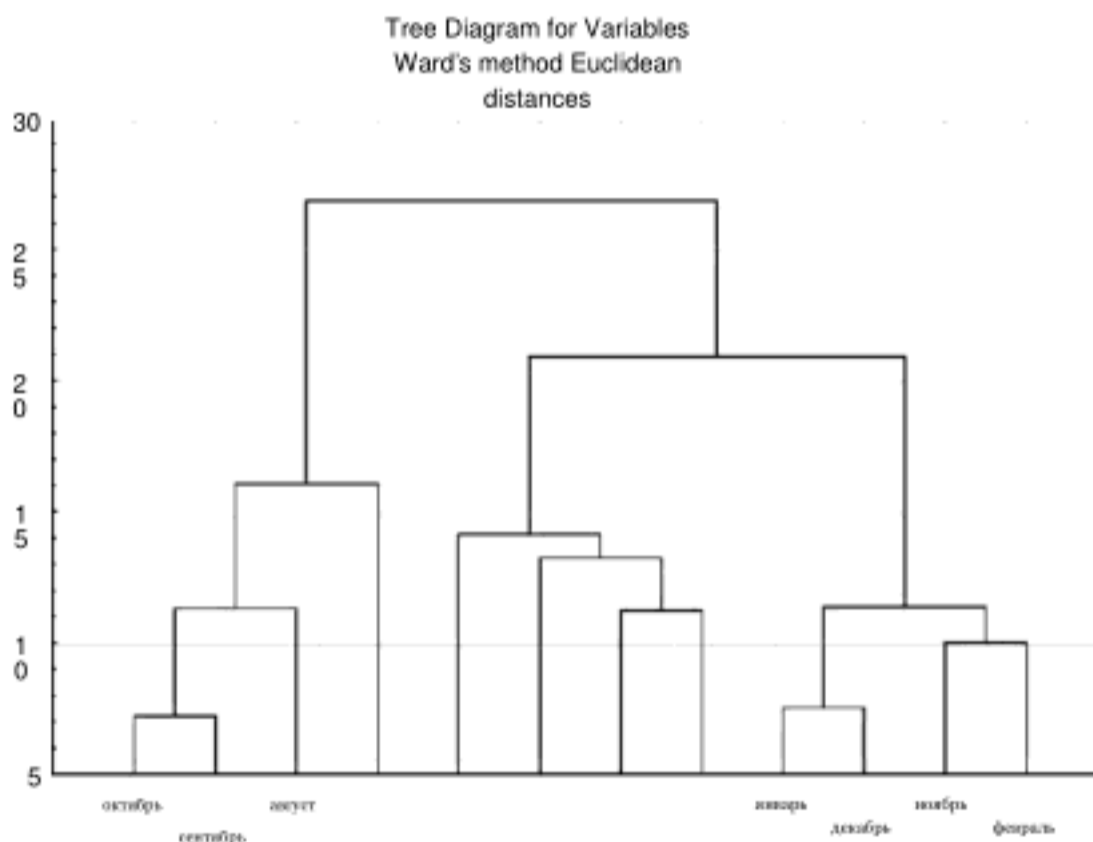


Рис. 3. Результат кластер-анализа массивов гидрохимических данных, сгруппированных по времени отбора проб

Полученные ряды наблюдений позволяют выявить ряд тенденций, характеризующих динамику гидрохимических показателей как в пространстве, так и во времени.

Водородный показатель pH в р. Болховец возрастает к устью, достигая максимума в средней части «центральной каскадной системы» (выявленной в результате кластерного анализа), а именно, в диапазоне створов Б7-Б9 (см. рис. 4 - А). Фоновый участок (родник) имеет, как правило, нейтральную реакцию среды (pH=6.5-7.5). По временной характеристике значения pH изменяются следующим образом: в зимний сезон, а также в период выпадения осадков (апрель, июнь) реакция речной воды близка к нейтральной, что, в первом случае, связано со

слабыми, в сравнении с весенне-летним периодом, процессами фотосинтеза (при потреблении  $\text{CO}_2$  водной растительностью высвобождаются ионы  $\text{OH}^-$ ), а во втором - с разбавлением речной воды атмосферной водой - слабокислой по величине  $\text{pH}$ ; в летне-осенний сезон  $\text{pH}$  воды повышается.

Показатель общей минерализации воды в р. Болховец в большей степени варьирует во времени, чем по контрольным створам (см. рис. 4 - Б). В пространственном отношении наибольшие контрасты в содержании растворенных минеральных веществ наблюдаются в центральной и устьевой частях русла (Б4-Б13) - в пределах городского отрезка течения, на участке интенсивного сброса ливневых вод. Для внутригодовой динамики величины общей минерализации характерны максимумы в зимнюю межень (1000-1200 и выше мг/л) и минимумы - в период весеннего половодья, а также интенсивного выпадения осадков в апреле и июне (750-850 мг/л).

Максимальное содержание иона аммония в реке (см. рис. 5 - А) наблюдается в летне-осенний период, что связано с процессами эвтрофикации реки в период летней межени, а также с отмиранием и разложением водных организмов в осенний период. Зимой, в связи с замиранием процессов жизнедеятельности водной растительности, наблюдается тенденция уменьшения содержания иона аммония. В весенне-летний период концентрация иона аммония продолжает оставаться сравнительно невысокой - как результат интенсивного усвоения иона аммония растениями при фотосинтезе. В целом содержание аммиака в воде нигде не превышает норму - 2 мг/л по азоту; однако, в летне-осенний период наблюдается превышение ПДК аммоний-иона для рыбохозяйственного назначения (0,5 мг/л) практически во всех участках реки, при этом наблюдается значительное увеличение концентрации иона аммония в начальной и устьевой каскадных системах водосбора реки.

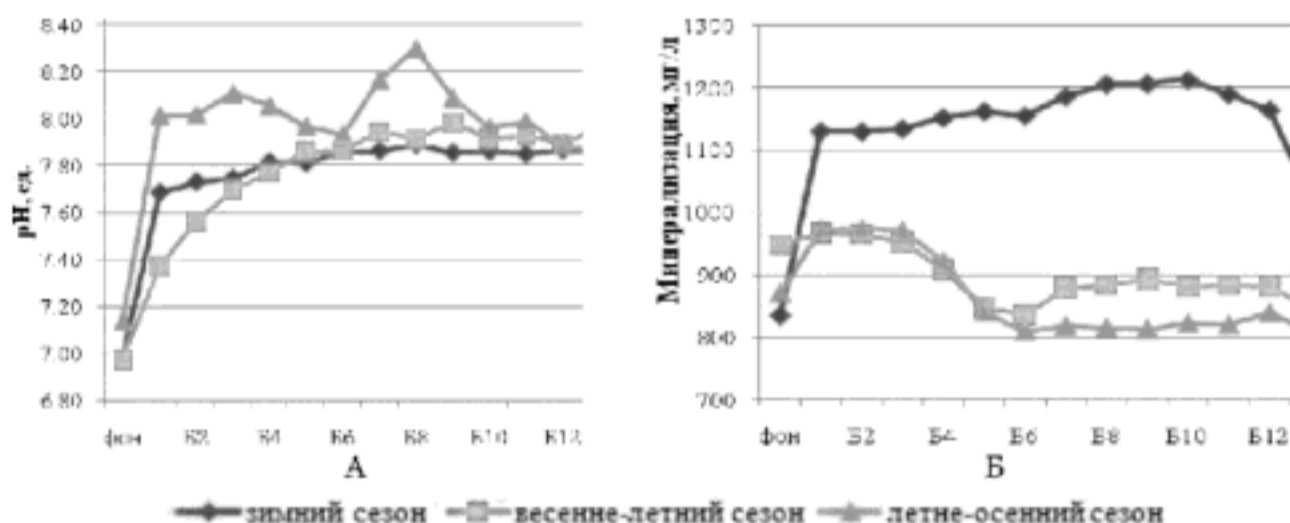
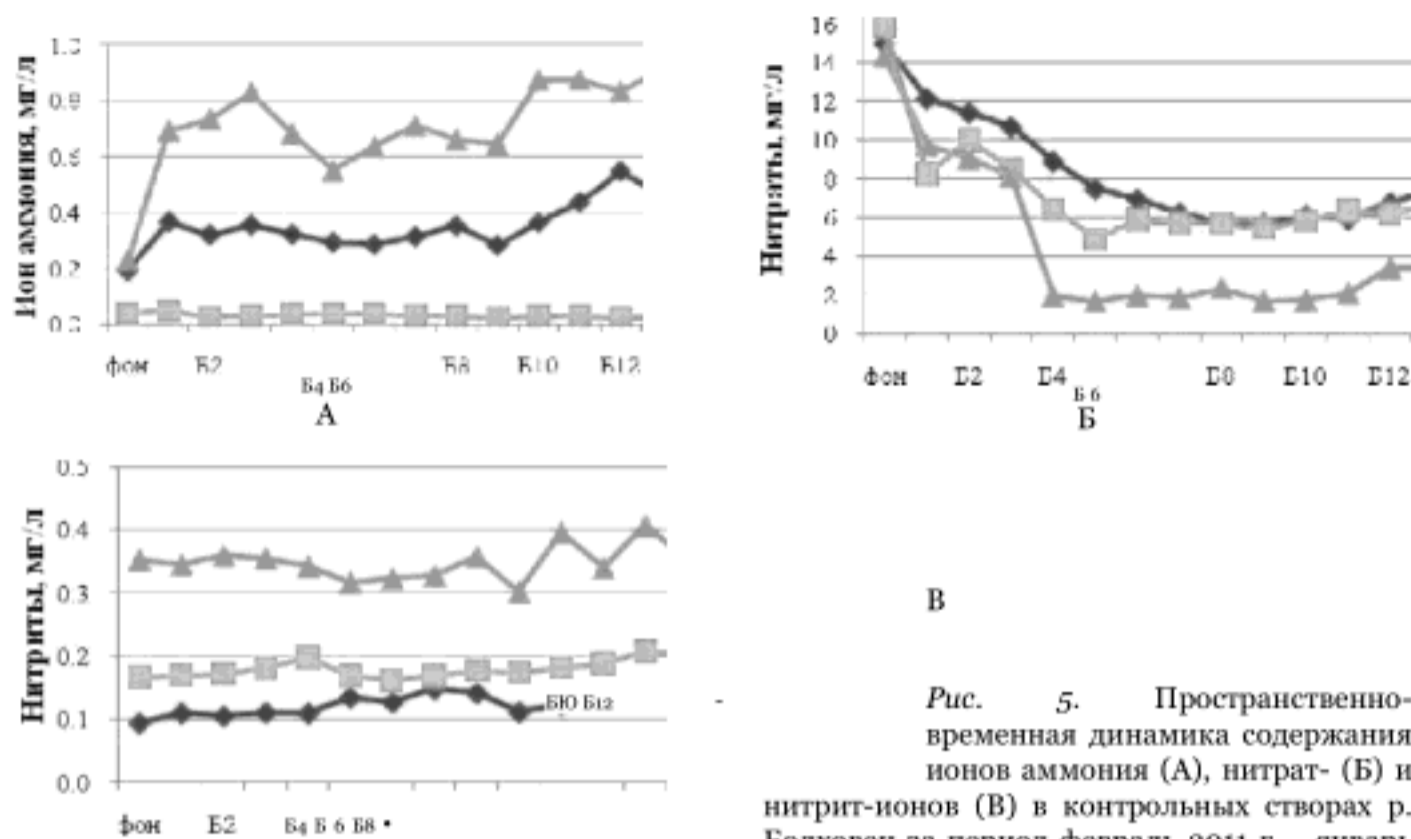


Рис. 4. Пространственно-временная динамика водородного показателя  $\text{pH}$  (А) и общей минерализации (Б) в контрольных створах р. Болховец за период февраль 2011 г. - январь 2012 г.

Содержание нитратов и нитритов (см. рис. 5 - Б и В, соответственно) имеет более выраженную сезонную динамику, по сравнению с пространственной изменчивостью, особенно это характерно для содержания нитрит-ионов. При этом они изменяются во времени разнонаправленно: в летний период происходит рост концентрации нитрит-ионов и снижение концентрации нитрат-ионов. Наибольшая концентрация нитритов в конце лета связана с активностью фитопланктона (в частности, способность диатомовых и зеленых водорослей восстанавливать нитраты до нитритов). Концентрация нитратов в поверхностных водах подвержена заметным сезонным колебаниям: минимальная в вегетационный период, она увеличивается осенью и достигает максимума зимой, когда при минимальном потреблении азота происходит разложение органических веществ и переход азота из органических форм в минеральные [6]. В целом, содержание нитрат-ионов - более информативный показатель для выявления пространственных различий. Так, данный показатель снижается в р. Болховец при ее впадении в каскад расширений русла (городской участок), что вероятно, связано с процессами самоочищения в этих водоемах.



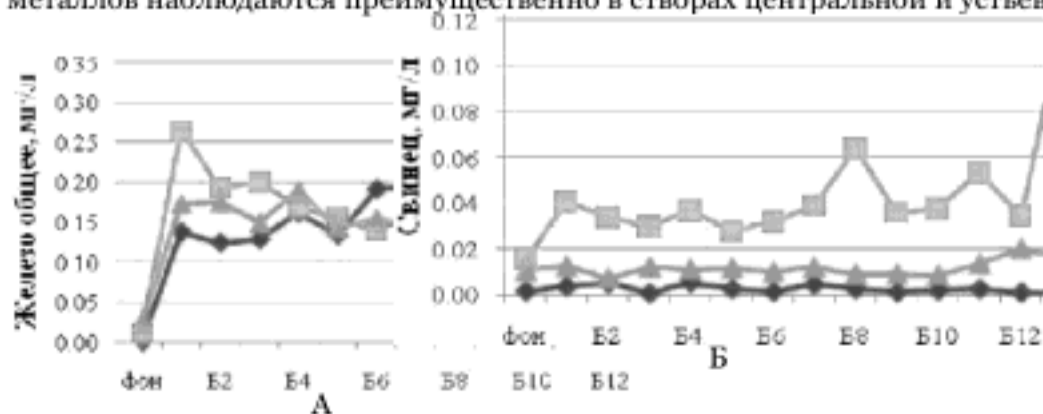
В

Рис. 5. Пространственно-временная динамика содержания ионов аммония (А), нитрат- (Б) и нитрит-ионов (В) в контрольных створах р. Болховец за период февраль 2011 г. - январь 2012 г.

Содержания нитратов, нитритов и аммонийного азота являются важными показателями химического состава воды, которые используются при проведении экологической оценки и нормировании качества природных вод [7]. Нитриты представляют собой промежуточную ступень в цепи бактериальных процессов окисления аммония до нитратов (нитрификация - только в аэробных условиях) и, напротив, восстановления нитратов до азота и аммиака (денитрификация - при недостатке кислорода). Наличие иона аммония и нитритов в концентрациях, превышающих фоновые значения, указывает на свежее загрязнение, в то время как увеличение содержания нитратов - на загрязнение в предшествующее время [6].

Информативным показателем для исследования пространственной и временной динамики гидрохимического состояния рек является содержание железа общего (см. рис. 6 - А) [6]. Вода родника, питающего р. Болховец, практически не содержит данного металла, а в контрольных створах содержание железа возрастает, особенно в городском отрезке (центральная и устьевая каскадные системы). Во временном отношении содержание железа общего в водах городского участка р. Болховец возрастает в весенне-летний сезон, достигая максимума в период выпадения осадков. В некоторых створах городского отрезка течения (особенно в устьевой части) в этот период отмечаются превышения ПДК по данному микроэлементу.

Показатели содержания ионов таких тяжелых металлов, как свинец, медь и цинк отличаются очень сильной изменчивостью как в пространственном, так и во временном отношении (см. рис. 6 - Б, В и Г, соответственно). В целом, концентрации этих элементов возрастают в весенне-летний период, когда сток рек в большей степени определяется поверхностным стоком. Пространственные колебания могут быть обусловлены локальным поступлением данных элементов и сравнительно быстрым самоочищением рек от них (накоплением в донных отложениях). Это может проявляться в отдельных каскадных системах: повышенные концентрации ионов тяжелых металлов наблюдаются преимущественно в створах центральной и устьевой частях русла.



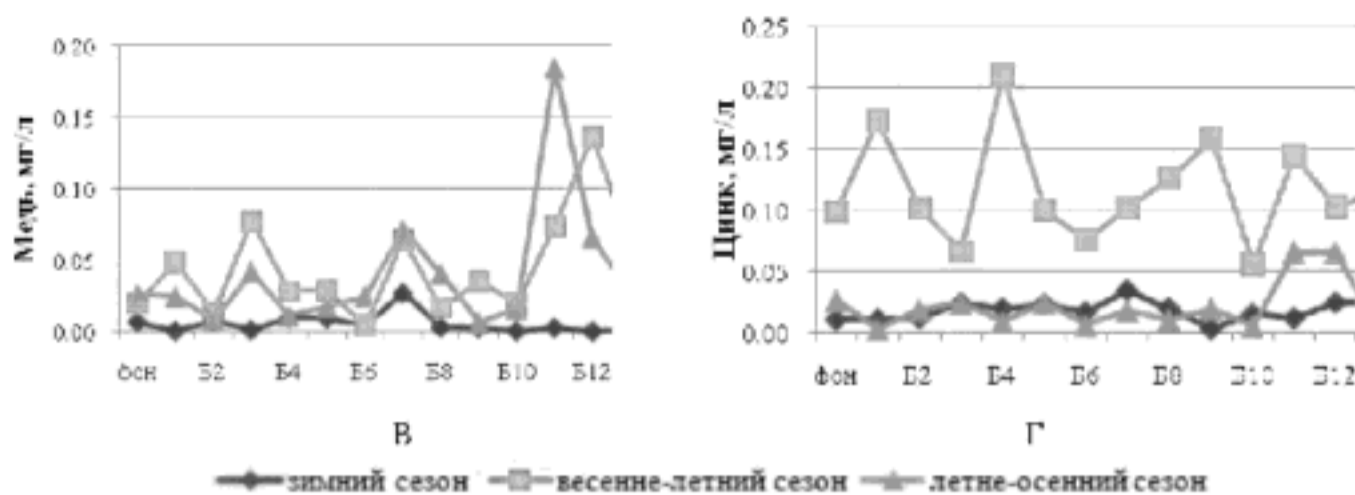


Рис. 6. Пространственно-временная динамика содержания железа общего (А), свинца (Б), меди (В) и цинка (Г) в контрольных створах р. Болховец за период февраль 2011 г. - январь 2012 г.

### Выводы

В следствие разноуровневой антропогенной нагрузки на территорию бассейна реки Болховец («сельский» и «городской» типы застройки), а также в виду морфологической неоднородности русла р. Болховец, в городской черте представленного последовательностью техногенных водоемов, произошло формирование каскадных гидрохимических систем внутри речного бассейна, которые могут быть выявлены методом кластерного анализа исследуемых гидрохимических характеристик.

Начальная каскадная система (створы Б1-Б3) отличается преобладанием на данном участке реки гидрохимических показателей преимущественно агрогенного происхождения (ионы аммония, нитрат-ионы, основным источником поступления которых является поверхностный сток с сельскохозяйственных территорий), в то время как в створах центральной и устьевой каскадных систем (Б4-Б13), соответствующих «городскому» типу застройки, отмечаются повышенные содержания элементов преимущественно техногенного характера - тяжелых металлов, поступающих в реку со стоками ливневой канализации с территории урбогеосистемы.

Временная изменчивость гидрохимических показателей соотносится с различными фазами гидрологического режима реки. Так, при снижении водности реки (летне-осенняя и зимняя межень) наблюдается определенное увеличение концентраций ионов аммония (летне-осенний период), нитрат- (зимой) и нитрит-ионов (летом), а также рН воды. При увеличении расходов воды, в период весеннего половодья и интенсивных осадков, как правило, в реке возрастает концентрация тяжелых металлов (железа общего, свинца, цинка и меди), поступающих в реку вместе с поверхностным стоком, и, соответственно, уменьшается величины рН и общей минерализации.

В условиях антропогенного воздействия пространственно-временная организация реки трансформируется в сторону упрощения временной динамики гидрохимических показателей и усложнения - пространственной.

### Список литературы

1. Парфенова Г.К. Эволюция техногенеза гидрохимических показателей качества вод урбанизированных территорий (на примере бассейна Верхней Оби): автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра геогр. наук: 25.00.27. / Г.К. Парфенова; Томский государственный университет - Томск: 2004. - 38 с.
2. Прядко М.П., Голушов П.В. Особенности трансформации гидрохимического режима функционирования малых городских рек // Проблемы региональной экологии. - 2011. - №2. - С. 36-4°.
3. Дегтярь А.В. Гидролого-экологический анализ деградационных процессов в речных бассейнах малых рек юго-запада Центрально-черноземного региона: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геогр. наук: 25.00.27. / А.В. Дегтярь; Белгородский государственный университет. - Белгород, 2005. - 24 с.
4. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р. и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1989. - 215 с.
5. Жигарев Д.В. Учет закономерностей формирования дождевого стока с урбанизированных территорий при защите водных объектов от загрязнения: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. технич. наук: 25.00.36. / Д.В. Жигарев; Читинский государственный университет - Чита: 2004. - 18 с.
6. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы / Под ред. Т.В. Гусевой. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. - 192 с.
7. Брагинский Л. П. Некоторые принципы классификации пресноводных экосистем по уровням токсической загрязненности // Гидробиол. журн. - 1985. - Т. 21. - № 6. - С. 65-73.



**THE ANALYSIS OF SPACE-TIME PATTERNS OF THE HYDROCHEMICAL INDICES  
VARIABILITY OF THE BOLKHOVETZ RIVER**

Belgorod State National Research University, Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: *Mariel0313@yandex.ru, Golousov@bsu.edu.ru, Kornilov@bsu.edu.ru, Kolmykov@bsu.edu.ru, GLEO89@yandex.ru*

The features of the river Bolkhovez functioning as the cascade hydro-chemical system are considered. The results of monitoring water quality in different economic use of catchment areas are produced. Spatial differences of the water chemical composition in these areas and the main phase of the hydrochemical state of the river over time are revealed using the method of cluster analysis. The space-time organization of the river as a cascade of hydro-chemical system is a reaction to the anthropogenic transformation of catchment areas, and it should be taken into account while planning monitoring studies and environmental rehabilitation.

**Keywords:** small rivers, chemical pollution, hydrochemical cascading system, spatial and temporal variability, cluster analysis.