

## ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТОКА ОТ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ БАССЕЙНА В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ

© А. В. ХОРОШЕВ,<sup>1</sup> А. Н. ЛУКЬЯНОВА,<sup>2</sup>  
А. Г. КОСИЦКИЙ,<sup>3</sup> Д. И. ШКОЛЬНЫЙ<sup>4</sup>

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

географический факультет

E-mail: <sup>1</sup>avkh1970@yandex.ru

<sup>2</sup>lan22-66-88@mail.ru

<sup>3</sup>alexhydro@mail.ru

<sup>4</sup>thabigd@gmail.com

Цель исследования — выявление зависимости межгодовой и межсезонной изменчивости гидрохимических и гидрологических показателей в нижнем створе бассейна малой реки от ландшафтной структуры бассейна в целом. На примере бассейна р. Заячья (Устьянский район Архангельской области) и бассейнов ее притоков, различных по степени распаханности и лесистости, проверялась гипотеза о существовании регионально-специфичных соотношений площадей и взаиморасположения видов урочищ и земельных угодий, при которых достигается стабилизация (низкая изменчивость) гидрологического и гидрохимического режима. Использованы сезонные измерения 2013—2017 гг. в 12 створах. На основе корреляционного анализа установлено, что сокращение лесных и расширение пахотных и луговых угодий в сильнорасчлененном агроландшафте приводит к формированию ряда новых эмерджентных свойств геосистем речных бассейнов: переходу вод из кальциевой группы в магниевую, изменению амплитуд колебаний гидрохимических характеристик и модуля стока. Создание агроландшафтов приводит к снижению межгодовой неравномерности и росту модуля стока. Под лесным покровом сохраняются естественные колебания химического состава вод, обусловленные значительными различиями минерализации в многоводные и меженные периоды. При снижении лесистости ниже 30 % площади бассейна содержание ионов гидрокарбонатов, кальция, магния в водах рек во время весеннего половодья, несмотря на сильное разбавление, становится сопоставимым с высокими содержаниями, характерными для меженных периодов.

Ключевые слова: сток, химические свойства, агроландшафт, изменчивость, лесистость, распаханность, корреляционный анализ.

**Введение.** Свойства каждой территориальной единицы ландшафта являются результатом синергизма во взаимодействиях большой группы пространственных элементов, упорядоченных в какой-либо тип ландшафтных структур [10]. Выбрав соответствующий способ описания мозаичности территории, можно адекватно объяснить пространственную и временную вариабельность того или иного свойства компонентов ландшафта. Для описания внутренней мозаичности речных бассейнов и моделирования стока введены понятия: стокоформирующий комплекс, ландшафтно-гидрологический комплекс [4, 5], которые обозначают квазиоднородную по условиям формирования стока часть территории бассейна. Современный ландшафтно-гидрологический подход основывается на представлениях о соответствии и взаимообусловленности ландшафтных и гидрологических территориальных структур для объяснения различий стока рек и изменений стоковых и водно-балансовых соотношений при изменении ландшафтной обстановки [9]. Сравнение свойств пространственной структуры, формирующихся при разных соотношениях площадей элементов ландшафтного покрова в бассейне, позволяет выявить их пороги-

вые значения, при которых может достигаться тот или иной эмерджентный эффект, необходимый для территориального планирования хозяйства и природоохранных мер. В нашем исследовании в качестве исследуемого компонента выступали поверхностные воды, а в качестве предиктора — соотношения площадей элементов ландшафтного покрова в бассейне. В качестве показателя эмерджентного эффекта рассматривалась изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик для водосборных бассейнов разного порядка. Появление новых свойств геосистемы при превышении критического порога трансформации ее ландшафтной структуры квалифицировалось нами как проявление эмерджентных эффектов. Практический смысл подобных исследований заключается в том, что соотношение и взаиморасположение угодий в бассейне, параметры буферных зон для регулирования нежелательных потоков могут быть предметом специальных планировочных решений [14–16].

Цель исследования — выявление зависимости межгодовой и межсезонной изменчивости гидрохимических показателей и межгодовой изменчивости гидрологических показателей в нижнем створе бассейна малой реки от ландшафтной структуры бассейна в целом. Проверялась гипотеза о существовании регионально-специфичных соотношений площадей и взаиморасположения видов урочищ и земельных угодий, при которых достигается стабилизация (низкая изменчивость) гидрологического и гидрохимического режима. Поставлены следующие вопросы: 1) каким образом лесистость и распаханность отражаются на модулях стока и амплитудах колебания стока, 2) каковы источники основных ионов в поверхностных и подземных водах и меняются ли они по сезонам, 3) как варьирование пространственных пропорций угодий между малыми бассейнами в агроландшафте отражается на изменчивости гидрологических и гидрохимических характеристик.

**Материалы и методы.** Исследуемый бассейн р. Заячья (152 км<sup>2</sup>) расположен в южной части Устьянского района Архангельской области. Заячья — правый приток р. Кокшеньги, впадающей в р. Устья, которая в свою очередь принадлежит бассейну р. Ваги. Бассейн расположен целиком в пределах среднетаежного ландшафта структурно-эрозийно-моренной волнистой равнины с неглубоким залеганием пермских мергелей с сочетанием мелколиственно-еловых лесов на подзолистых почвах и болот, частично распаханной в дренированных местностях [10]. По литологическим условиям стокоформирующие комплексы отличаются мощностью песчано-супесчаного плаща и моренных суглинков, что определяет и размещение хозяйственных угодий.

Леса представлены 40—70-летними вторичными березово-сосновыми древостоями с елью во 2-м ярусе на торфянисто-подзолистых и подзолистых почвах, часто с вложенным субпрофилем альфегумусового подзола. Они занимают внутренние плоские части междуречий, удаленные от бровок, как правило, на расстояние 400—700 м, где песчано-супесчаный озерно-ледниковый плащ имеет повышенную мощность (30—70 см) и подстилается тяжелыми моренными суглинками (мощность до 20 м). В верхних (потенциально пахотных) горизонтах средние концентрации обменного кальция составляют 7 ммоль/100 г, обменного магния — 1.6 ммоль/100 г, средний рН водный составляет 5.18. Оглеение почв на контакте с суглинистым водоупором делает распашку нецелесообразной. Пахотные угодья в таких местоположениях в прошлом подвергались осушительным мелиорациям, но после 1990-х гг. были заброшены и активно зарастают ивняками и березняками (рис. 1).

В прирбовочной дренированной части плоских междуречий и на пологих придолинных склонах мощность плаща легких отложений сокращается до 10—20 см, что позволяет проводить распашку неоглеенных подзолистых почв на протяжении не менее семи столетий. На склонах долин с уклонами 5—12° в естественном состоянии были распространены дерново-подзолистые и серогумусовые почвы, сформировавшиеся на маломощных (5—15 см) моренных суглинках, подстилаемых пермскими мергелями (рис. 1). В пахотных горизонтах таких урочищ средние концентрации обменного кальция составляют 19 ммоль/100 г (диапазон значений 6—37 ммоль/100 г), обменного магния — 6 ммоль/100 г (диапазон 1—10 ммоль/100 г), средний рН водный составляет 7.72 (диапазон 6.84—8.59). Высокое по среднетаежным меркам плодородие таких почв благоприятствует распашке. Одна из причин повышенной жесткости вод (до 7.5—8.2 мг-экв/л в период межени) — смыв при распашке маломощных почв со склонов, сложенных мергелями, особенно при отсутствии террасы, выполняющей функцию буфера [1]. Местами река непосредственно подмывает крутые коренные склоны.

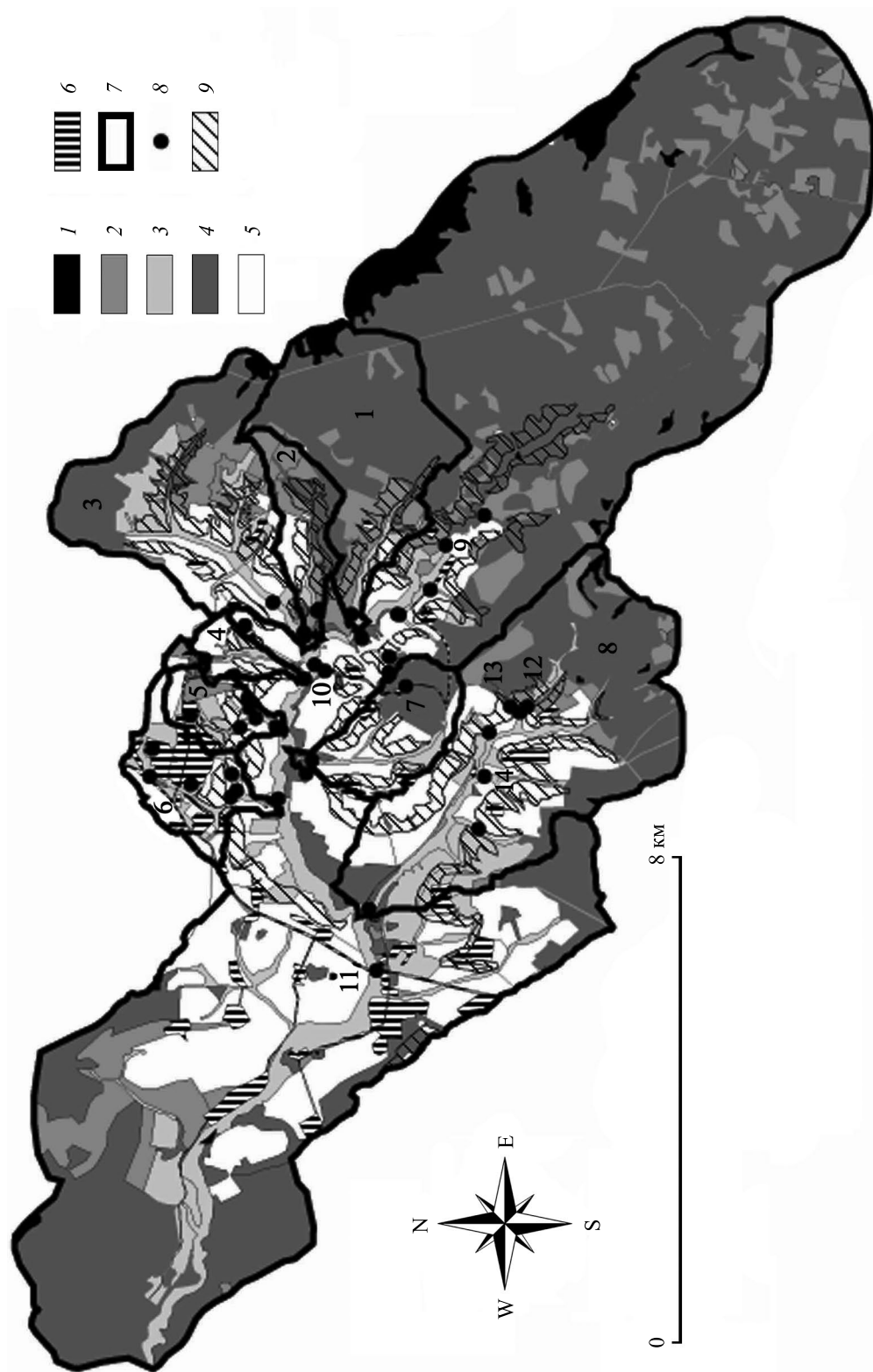
Наряду с безлесными угодьями, в долинах р. Заячьей и ее притоков — рек Стругницы, Козловки, Межницы, Камешницы — присутствуют и склоновые леса, препятствующие смыву почв и вовлечению мергельного материала в миграцию (рис. 1). Распашке подвержены также широкие делювиальные шлейфы у подножий склонов, сложенные суглинистым материалом, и цокольные террасы с чехлом песков на моренных суглинках, подстилаемых мергелями.

Луговые сенокосные угодья приурочены к поймам. Суходольные луга встречаются в каждом бассейне на крутых, ранее распахивавшихся склонах, а также в периферийной части плоских междуречий в местоположениях, наиболее удаленных от дорог и населенных пунктов.

Все населенные пункты расположены в прирбовочных дренированных частях междуречий, многие из деревень — на мысообразных узких водораздельных поверхностях между двумя долинами. Территория хорошо исследована и обеспечена серией ландшафтных карт масштабов 1:50 000 и 1:10 000 [10, 11].

Гидрологические и гидрохимические исследования в бассейне р. Заячья с измерением расходов воды и отбором проб на содержание растворенных веществ по сезонам проводятся с 2013 г. Ранее в 1994—2000 гг. также проводились сезонные гидрохимические наблюдения. Регулярные измерения проводятся в 12 створах, из которых три расположены на р. Заячья, восемь — в нижних створах ее притоков, один — на роднике; кроме того, в весенние и влажные летние сезоны проводилось дополнительное гидрохимическое исследование серии временных водотоков и постоянных ручьев (рис. 1). К настоящему времени проведено 14 экспедиций. Они пришлись на разные фазы водного режима. Пять экспедиций выпали на период устойчивой межени: три зимние и две летние. Именно меженные гидрологические измерения позволяют выявить основные пространственные закономерности формирования стока, поскольку в данную фазу водного режима все водотоки находятся в относительно однородных условиях.

Гидрологические и гидрохимические свойства водотоков зависят от их размеров. Характеристикой, определяющей размер водотока, могут служить его длина, площадь водосбора, протяженность речной сети и др. Проведенные ранее исследования [3] показали, что для гидрологических исследований удоб-



ной характеристикой является порядок реки, определяемый методом А. Шайдеггера [13]:

$$N = \log_2 P + 1,$$

где  $P$  — количество водотоков первого порядка в бассейне реки. Под водоток первого порядка понимается река, не имеющая притоков.

Измерения проведены в близкорасположенных бассейнах 1—4-го порядков сходных размеров, отличающихся по пропорциям склоновых и плоских поверхностей, лесистости в целом и на склонах, распаханности в целом и на склонах (рис. 1, цифры 1—8). Эти бассейны включены в бассейн р. Заячьей, на которой измерения производились в трех створах (рис. 1, цифры 9—11).

Порядок р. Заячьей по методу Шайдеггера определен как 4.9 на выходе из верхней залесенной части бассейна (створ у д. Орюковская), 5.8 — в центре агроландшафта в средней части бассейна после впадения водотоков из частично залесенных бассейнов (д. Заячерецкий Погост), 6.3 — на выходе из агроландшафта в нижней части бассейна (створ у д. Ульяновская). Для каждого из 12 створов проведено осреднение измеренных в меженный период расходов воды. В результате получены условно характерные меженные расходы воды  $Q_{у.м.}$ , соответствующие каждому створу. С их помощью получены условно характерные меженные модули стока рек  $M_{у.м.}$ . Следует подчеркнуть, что абсолютные величины полученных расходов воды и модулей стока мало информативны, поскольку они отражают конкретные условия, соответствующие периоду проведения измерений. Однако значения  $Q_{у.м.}$  и  $M_{у.м.}$  вполне пригодны для сравнения меженного стока разных рек. Кроме того, для каждого створа рассчитано среднее квадратичное отклонение меженных расходов воды для предварительной оценки изменчивости меженного стока.

Определение содержания ионов гидрокарбоната в водах проводилось объемным ацидометрическим методом [12], определение остальных основных ионов — на системе капиллярного электрофореза «Капель» [6], концентрации минерального и валового фосфора определялись на спектрофотометре по методу Морфи—Райли [8].

**Результаты.** Обычно меженные модули стока увеличиваются с ростом залесенности водосборов, поскольку лес способствует более интенсивной инфильтрации воды в подземные водоносные горизонты. Это приводит к сокращению поверхностного стока в период дождей и снеготаяния за счет пополнения подземных вод, которые срабатываются в меженный период, увеличивая меженный сток. В нашем случае с ростом лесистости, напротив, наблюдалось уменьшение модулей стока (рис. 2, а). В летние меженные периоды модуль стока составляет 1.7—4.4 л/с · км<sup>2</sup> в бассейнах с лесистостью более 30 %,

---

Рис. 1. Ландшафтный покров бассейна р. Заячья и фактический материал.

1—8 — бассейны малых рек, регулярно опробованных в нижнем створе; 9—11 — опробованные створы р. Заячья; 12—14 — разовые весенние опробования малых рек с интервалом в один день. Черными кружками показаны все точки опробования, включая весенние измерения на временных водотоках.

1 — болота, 2 — лесная поросль и молодняки до 20 лет, 3 — залежи и луга, 4 — леса, 5 — пашни, 6 — застроенные и запечатанные территории, 7 — границы бассейнов, 8 — точки отбора проб, 9 — крутые склоны с выходами мергелей.

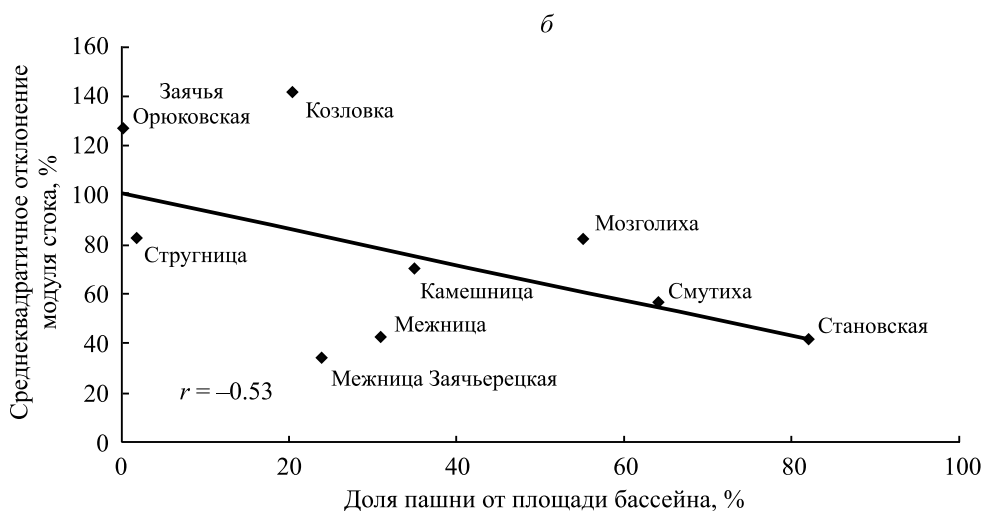
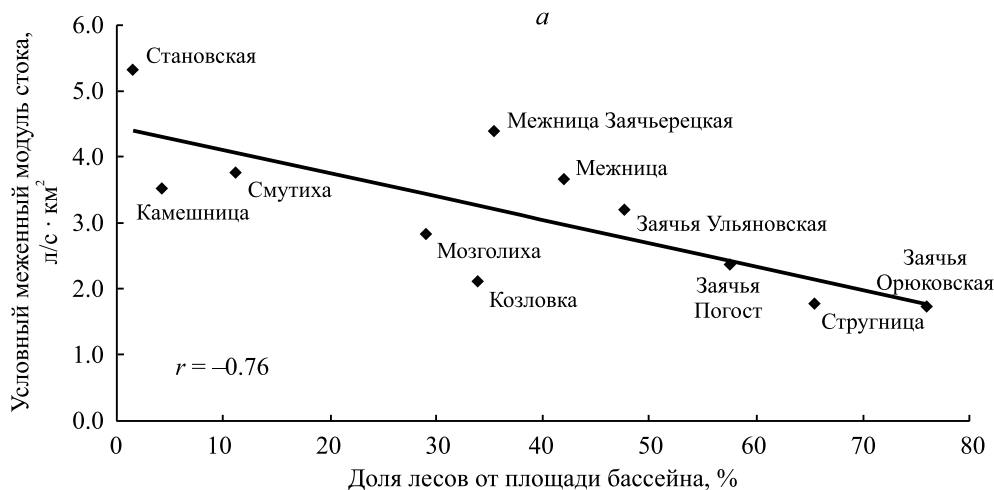


Рис. 2. Характеристики зависимости модуля стока и его изменчивости от ландшафтной структуры бассейна.

а — соотношение условных меженных модулей стока и залесенности водосборов рек; б — зависимость среднеквадратичного летнего меженного стока от распаханности бассейна.

2.9—5.4 л/с · км<sup>2</sup> — при лесистости менее 30 %. В наиболее влажное лето 2017 г. коэффициент корреляции Спирмена между модулем стока и лесистостью (с возрастом древостоя 30 лет и более) составил 0.57.

Относительная изменчивость модуля стока (среднеквадратическое отклонение измеренных значений), рассчитанная с учетом данных, относящихся к устойчивой межени, снижается по мере роста распаханности бассейна (рис. 2, б), но увеличивается при росте лесистости. Это свидетельствует о двух противоположных ситуациях, способствующих росту изменчивости модуля стока: полной залесенности и почти полной распаханности бассейна. При некоторых промежуточных соотношениях угодий сток стабилизируется,

что давно отмечалось в литературе [7]. Невысокий коэффициент корреляции между распаханностью водосборов и относительной изменчивостью модулей стока объясняется зависимостью последней характеристики от размера реки. Известно, что с ростом размера водотока изменчивость гидрологических характеристик снижается. Если представить среднеквадратичное отклонение меженных модулей стока как функцию двух переменных: порядка реки и распаханности бассейна, то коэффициент множественной корреляции составит 0.64.

Исследованные водотоки по классификации О. А. Алекина [2] относятся к гидрокарбонатному классу, кальциевой или магниевой группе. Соотношение основных ионов в поверхностных и грунтовых водах варьирует в пределах ландшафта в соответствии с разным участием карбонатной морены московского возраста и пермских мергелей в формировании литогенной основы долины р. Заячьей и в бассейнах ее боковых притоков (см. таблицу). Воды восточной и южной, более залесенной, части бассейна р. Заячьей почти всегда принадлежат к кальциевой группе и характеризуются превышением содержания  $\text{Ca}^{2+}$  над  $\text{Mg}^{2+}$ , западного обезлесенного сектора — чаще наоборот. Это объясняется сокращением в западном направлении мощности моренного чехла, ростом доли крутых (более  $8^\circ$ ) коренных склонов, соответствующих выходам мергелей на поверхность (21 % в бассейне р. Стругницы, 30—35 % в бассейнах Становской балки и р. Смутихи), а также ростом распаханности до 55—82 % (рис. 1). В водах родника Святого, дренирующего грунтовые воды, сформированные на мергельных пластах, во время усиленного промывания отложений в многоводные весенние и осенние сезоны отношение  $\text{Ca}/\text{Mg}$  (в мг-экв/л) уменьшается до 0.2—0.62, в то время как в летнюю межень оно возрастает и наиболее сильно — до 0.81—0.85 — во влажные летние периоды (2014 и 2017 гг.). В зимнюю межень воды могут возвращаться в кальциевую группу: отношение  $\text{Ca}/\text{Mg}$  составляет 1.08.

В зимнюю межень, когда велика доля подземного питания, корреляция между концентрациями ионов  $\text{Ca}$  и  $\text{Mg}$  в водах рек отсутствует (рис. 3, а). Во время половодья весной 2013, 2015 и 2017 гг. и осенью 2013—2014 гг. в паводок наблюдалась строгая корреляция содержания ионов гидрокарбоната, кальция и магния, что показывает сходство источников их в поверхностных водах (рис. 3, б). Выбиваются из этой закономерности только воды родников.

Концентрации ионов магния в постоянных водотоках в весенний и осенний многоводный период прямо пропорциональны доле пашен и обратно пропорциональны доле лесов в бассейне (рис. 3, в). Особенно сильный скачок характерен при снижении лесистости до 7—8 % и росте распаханности до 64—82 % в бассейнах рек Смутихи, Становской балки, Камешницы. Следовательно, при господстве поверхностного стока во время весеннего снеготаяния общим источником этих ионов являются размываемые карбонатные почвы крутых склонов. В зимнем стоке рек (почти целиком связанным с подземным питанием) источники магния и кальция различаются — соответственно пермские мергели и карбонатная московская морена.

Для остальных ионов полученные результаты показывают более слабую связь с особенностями морфолитогенной основы и в то же время зависимость от хозяйственной деятельности. Поверхностные воды самых распаханых бассейнов (реки Смутиха, Камешница и Становская) выделяются наиболее высоким содержанием сульфатов и хлоридов в весенних водах, так как происходит интенсивное вымывание из почв продуктов минерализации осеннего

**Гидрологические и гидрохимические характеристики исследованных бассейнов**

Название водотока, пункт опробования	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Лесистость, %	Условный межновый модуль стока л/с · км <sup>2</sup>	Среднеквартальное отклонение модуля стока, %	Mg <sup>2+</sup> , весна (верхн.) и лето (нижн.), мг/л		Mg <sup>2+</sup> , ср. квартал. отклонение, все сезоны, мг/л	Ca/Mg, весна (верхн.) и лето (нижн.), среднее значение		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , весна (верхн.) и лето (нижн.), среднее значение, мг/л	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , ср. квартал. отклонение, все сезоны, мг/л	Cl <sub>2</sub> , весна (верхн.) и лето (нижн.) среднее значение, мг/л	Cl <sub>2</sub> , ср. квартал. отклонение, все сезоны, мг/л	P <sup>опт.</sup> среднее, межновые периоды, мкг/л	P <sup>опт.</sup> ср. квартал. отклонение, межновые периоды, мкг/л
					Mg <sup>2+</sup> , весна (верхн.) и лето (нижн.), мг/л	Mg <sup>2+</sup> , ср. квартал. отклонение, все сезоны, мг/л		Ca/Mg, весна (верхн.) и лето (нижн.), среднее значение	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , весна (верхн.) и лето (нижн.), среднее значение, мг/л						
Заячья, д. Орюковская	57.8	65.33	1.8	127	4.52	10.07	1.11	3.21	3.00	0.60	1.68	19.29	7.60		
Заячья, с. Заячье-рецкий Погост	84.3	57.47	2.4	64	16.54	12.01	0.99	3.41	1.92	1.65	0.80	15.77	12.02		
Заячья, д. Ульяновская	122	47.62	3.2	45	28.81	9.74	1.05	3.38	12.79	1.67	1.88	11.31	8.24		
					30.22		0.86	8.11	2.92	1.11					
							0.79	14.15		2.92					
<b>Реки восточного и южного секторов с повышенной лесистостью водосборов</b>															
Струтница	8.03	75.92	1.7	83	10.96	13.47	1.16	6.00	14.10	4.16	4.10	10.99	5.85		
Козловка	2.52	33.89	2.1	142	28.59	12.24	0.65	11.08	2.52	3.03	1.41	14.02	16.65		
Межница Заячье-рецкая	10.6	35.44	4.4	35	14.03	10.86	1.08	2.84	2.43	0.91	2.26	15.25	13.38		
Межница	17.6	41.85	3.7	43	29.14	13.09	0.59	1.97	4.80	1.24	4.55	13.13	6.22		
					16.76		1.03	1.66		1.08					
					32.28		0.71	3.15		5.66					
					15.30		0.88	4.60		1.35					
					37.31		0.55	7.14		5.46					
<b>Реки западного и северного секторов с повышенной распаханностью водосборов</b>															
Становская	1.60	8.26	5.4	41	33.17	4.47	0.88	6.02	3.06	6.43	3.07	4.16	2.73		
					31.93		0.50	7.43		5.58					

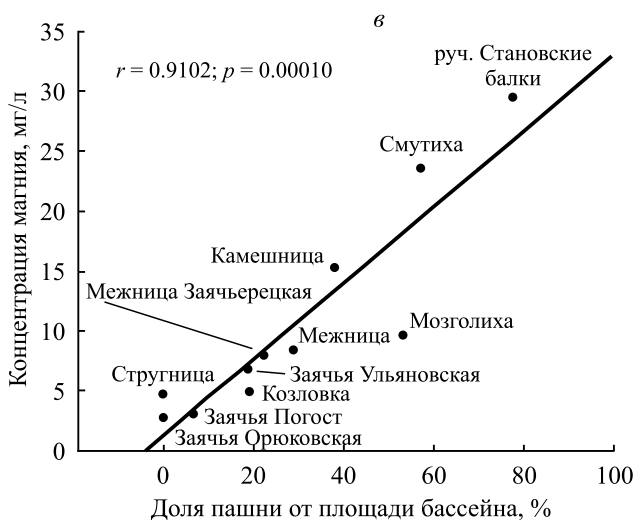
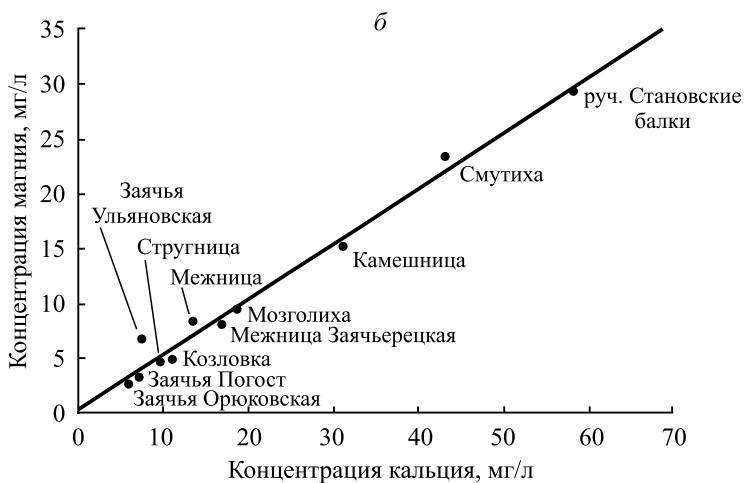
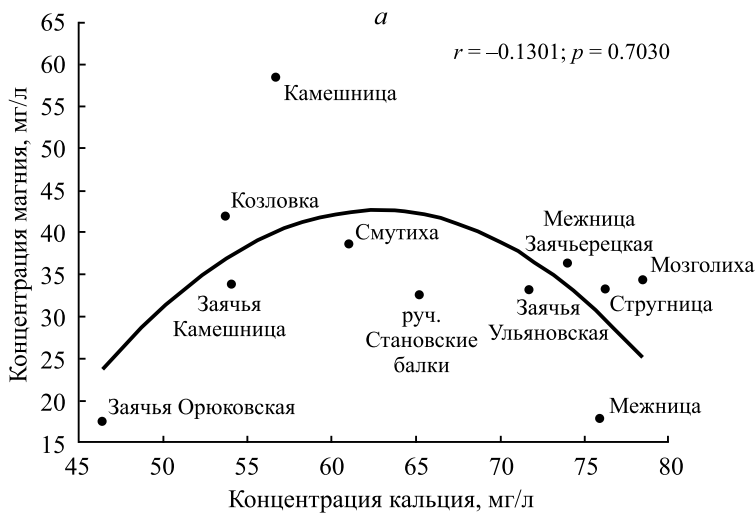


Смутиха	2.31	11.24	3.8	57	29.72	9.63	0.83	6.31	2.59	8.98	3.94	7.81	2.34
Мозголиха	3.05	29.03	2.9	83	30.45	13.10	0.80	5.82	1.64	7.34	1.68	10.87	5.94
Камешница	2.75	4.19	3.6	71	40.61	12.82	0.66	3.86	7.73	3.68	9.96	65.90	58.63
					47.73		0.81	11.73		14.53			
Святой	—	—	—	—	38.32	5.15	0.36	5.22	1.57	2.87	1.57	5.76	4.45
					36.73		0.66	4.84		3.56			

опада и внесенных удобрений, а также смыв отходов коммунального хозяйства деревень и животноводческой фермы, расположенных в верхней части водосборов, что позволяет расценивать эти ионы как один из компонентов загрязнения (см. таблицу). Показательно сравнение вод ручьев Смутиха и Становской балки, сопоставимых по площади, лесистости и доле крутых мергельных склонов. Воды Смутихи, имеющей контакт с бытовым загрязнением д. Нагорская, обогащены хлоридами, нитратами, органическим фосфором, нитритами. В Становскую балку не поступают воды с бытовыми загрязнениями, но бассейн ее распахан на 82 % (против 64 % в бассейне Смутихи), вследствие чего воды в летний период имеют более высокую концентрацию сульфатов и кальция. Грунтовые воды родников содержат минимальное количество органического и минерального фосфора по сравнению с поверхностными водами.

Сравнение проб воды, отобранных с разницей в 1 день 28—29.04.2013 г. в верхнем течении Межницы выше д. Алексеевской (площадь 2.55 км<sup>2</sup>, лесистость 73 %) (рис. 1, цифра 12), ее правом коротком притоке напротив д. Алексеевской (площадь 0.75 км<sup>2</sup>, лесистость 53 %) (рис. 1, цифра 13) и в левом притоке р. Серебрянки (площадь 1.43 км<sup>2</sup>, распаханность водосбора 60 %, лесистость 19 %) (рис. 1, цифра 14) выявило процесс смены источников питания и ее отражения в составе вод. Содержание всех основных ионов увеличилось в притоках с маленьким водосбором, но уменьшилось в верхнем течении Межницы с почти полностью залесенным водосбором. Для притоков это означало почти полное прекращение снеготаяния и притока снеговых маломинерализованных вод и переход к питанию поверхностно-склоновыми водами большей минерализации и далее к питанию почвенными и грунтовыми водами. В динамике вод Межницы проявилось, наоборот, усиление снеготаяния на лесном водосборе (более позднего по сравнению с полевым) и разбавление стока. В то же время в Межнице, в отличие от притоков, концентрация органического фосфора за день возросла с 22 до 45 мкг/л; фосфор начал активно выноситься из лесной подстилки по мере активизации снеготаяния.

Установлено влияние ландшафтного покрова бассейнов на сезонную и межгодовую вариабельность химического состава вод. Рост лесистости и снижение распаханности способствуют в ме-



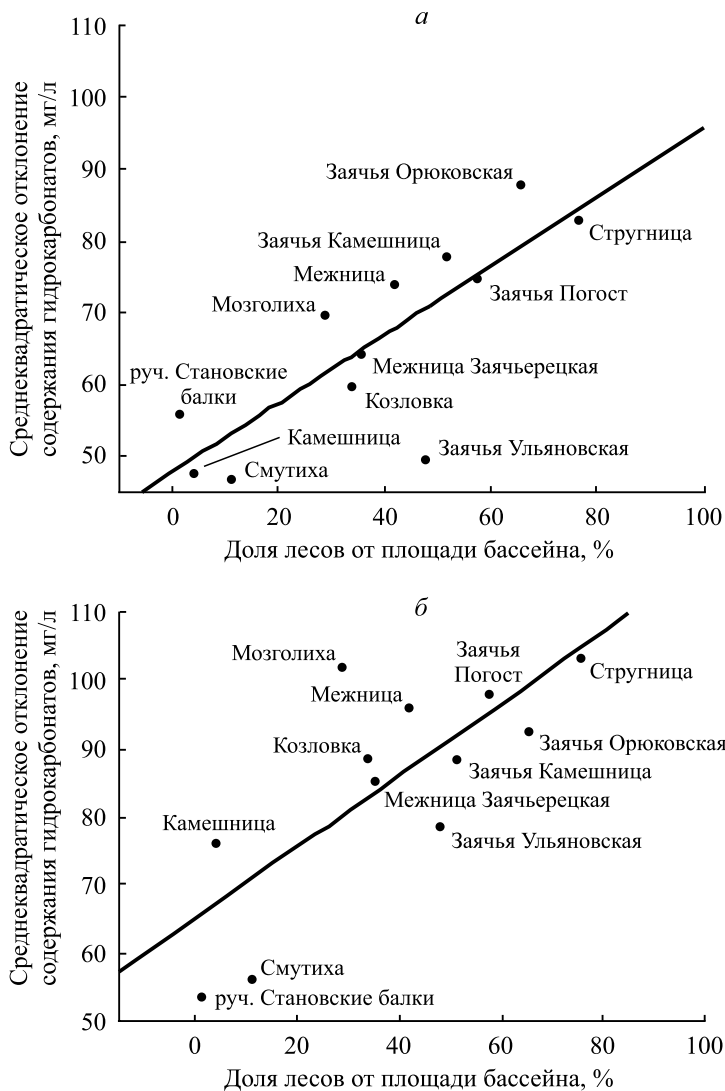


Рис. 4. Зависимость изменчивости (среднеквадратическое отклонение) концентраций гидрокарбонатов от лесистости бассейна.

*а* — в зимние, летние и осенние периоды 2013—2017 гг.; *б* — во все сезоны 2013—2017 гг., включая весеннее половодье.

женные периоды увеличению вариабельности содержаний гидрокарбонатов, калия, органического фосфора, минерализации (рис. 4, *а*). При расчете вариабельности с включением данных меженных периодов и трех весенних половодий рост лесистости увеличивает диапазон изменений кальция, магния, гидрокарбонатов, минерализации (рис. 4, *б*). Как и рост изменчивости мо-

Рис. 3. Отношение концентраций кальция и магния в водотоках в зимнюю межень (*а*) и в весенний паводок (*б*) 2013 г. и зависимость концентраций магния от распаханности бассейна в весенний паводок 2013 г. (*в*).

дуля стока, это происходит благодаря наличию значительно отличающихся периодов поступления воды из тающего снега по еще замерзшей почве и из грунтовых вод. Наибольшие внутригодовые колебания минерализации характерны для самых залесенных бассейнов — р. Стругницы и верхнего течения р. Заячьей (выше Орюковской). В наиболее распаханых и обезлесенных бассейнах р. Смутихи и, особенно, Становской балки весеннее снеготаяние вовлекает в сток большие объемы вещества распаханной почвы и коры выветривания мергелей, поэтому свойства поверхностного стока мало отличаются от характеристик летнего стока, обусловленного подземным питанием, всегда обогащенного кальцием и магнием (см. таблицу). Среди всех исследованных бассейнов для Становской балки характерны наименьшие межсезонные колебания содержаний гидрокарбонатов, магния, натрия, калия, органического фосфора. Отметим, что по минимальной изменчивости концентраций магния в меженные периоды ручей Становской балки сопоставим с родниками.

В стоке из водосборов с лесистостью более 25 % наблюдаются существенные сезонные колебания (см. таблицу): например, среднее квадратическое отклонение концентраций органического фосфора в меженные периоды составляет от 5.8 до 16.6 мкг/л, в то время как в бассейнах с низкой лесистостью — только 2.3—5.9 мкг/л (исключение — сильно загрязненная р. Камешница).

При сравнении малых бассейнов сопоставимой площади, рост распаханности на них снижает изменчивость содержания ионов гидрокарбоната, кальция, магния в водах; при этом варьирование переходит в более узкий диапазон значений по сравнению с залесенными бассейнами, но при более высоких концентрациях. Рост лесистости, наоборот, повышает изменчивость гидрохимических характеристик, наиболее зависящих от геологического строения. Рост доли луговых угодий вызывает увеличение изменчивости концентраций хлоридов и минерального фосфора, но снижение изменчивости концентраций гидрокарбонатов и минерализации. Таким образом, очевидно, что возвращение к фоновому гидрохимическому режиму — достаточно высокой изменчивости концентраций гидрокарбонатов и связанных с ними катионов — возможно только при повышении лесистости; замена пахотных угодий на луговые не дает этого эффекта.

Итак, для соседствующих малых бассейнов притоков р. Заячьей наши результаты показывают снижение изменчивости гидрологических и гидрохимических характеристик по мере роста размера реки и распаханности бассейна. Проверим, реализуется ли эта закономерность по мере роста водосборной площади на примере бассейна самой р. Заячьей. Среднее квадратическое отклонение меженных модулей стока р. Заячья в д. Орюковская составляет 127 %, к Заячерецкому Погосту оно снижается до 64 %, а в самом нижнем створе (д. Ульяновская) составляет 45 %. Сравнение межгодовой и межсезонной изменчивости содержаний ионов в разных ее створах проведено посредством F-теста для дисперсий. Установлено, что от верхнего створа в д. Орюковская (площадь водосбора 52 км<sup>2</sup>, распаханность 0 %) к нижнему створу, расположенному на выходе из агроландшафта (д. Ульяновская, площадь водосбора 116 км<sup>2</sup>, распаханность 18 %), рост расходов (от 190 до 400 л/с в летнюю межень) и концентраций ионов сопровождается ростом изменчивости содержания сульфатов, хлоридов, минерального фосфора, но снижением изменчивости натрия (т. е. ионы натрия поступают в воды реки почти равномерно в течение года). При этом изменчивость содержания гидрокарбонатов, кальция, магния, калия

не изменяется. В то же время в почти полностью залесенной верхней части бассейна (створ д. Орюковская) по сравнению со створом в средней части бассейна (д. Заячерецкий Погост, площадь водосбора 79 км<sup>2</sup>, распаханность 7 %) наблюдается более высокая изменчивость хлоридов, нитратов и натрия.

**Обсуждение результатов.** Изучение изменений гидрологического и гидрохимического режима под действием сельскохозяйственной деятельности требует прежде всего определения того, что считать фоновыми условиями. Наше исследование показало, что в естественных условиях в бассейнах с лесистостью более 50 % характерны невысокие концентрации гидрокарбонатов, магния, кальция, минерального фосфора, но повышенные концентрации органического фосфора по сравнению с распаханными бассейнами. При этом в условиях, близких к естественным, характерна повышенная межгодовая и сезонная изменчивость концентраций этих ионов, что связано с ярко выраженным чередованием периодов с преобладающей ролью снегового, дождевого или грунтового питания. Высокая изменчивость возникает в тех водотоках, в которых возможны периоды резких понижений концентраций при повышенном модуле стока, т. е. во время весеннего половодья и дождевых паводков.

В распаханых бассейнах происходит снижение изменчивости гидрохимических показателей, связанных с наличием в геологическом субстрате бассейнов осадочных карбонатных пород с повышенным содержанием магния. Характерной особенностью водотоков распаханых бассейнов становится сокращение или даже исчезновение периодов с низкими концентрациями. В периоды снеготаяния или летних паводков (как в 2017 г.) концентрации не падают, как это обычно происходит в фоновых условиях, а остаются высокими благодаря дополнительному источнику ионов — смыву почв, насыщенных основаниями, с распахиваемых крутых и покатых склонов долин.

Для некоторых ионов наблюдалась иная закономерность, выраженная в положительной корреляции между концентрациями и их изменчивостью. Повышенная изменчивость концентраций сульфатов, хлоридов, калия, натрия и, особенно, минерального растворимого фосфора характерна для водотоков с распахаными водосборами, в водах которых возможен эпизодический рост концентраций существенно выше фоновых значений за счет химического загрязнения с удобрениями, отходами жизнедеятельности животных и коммунальными стоками.

Таким образом, замещение зонального лесного растительного покрова сельскохозяйственными угодьями приводит к увеличению межennaleго модуля стока и к уменьшению его изменчивости. Межсезонная и межгодовая изменчивость концентраций ионов литогенного происхождения по мере сокращения зонального растительного покрова снижается, а ионов антропогенного происхождения — возрастает. Последнее обусловлено как залповыми выбросами загрязняющих веществ, так и неравномерностью внесения удобрений на поля в зависимости от года севооборота. Рост распаханности способствует формированию устойчиво высоких, в отличие от фона, концентраций ионов литогенного происхождения. Это свидетельствует об усилении выноса вещества поверхностным стоком в теплый период, что делает гидрохимические характеристики половодья сопоставимыми с зональными характеристиками межennaleго периода. Отметим, что доля болотных вод в питании исследованных малых рек невелика (в отличие от р. Заячьей). Даже если лето влажное (как в 2014, 2017 гг.), дождевое питание не способствует разбавлению кон-

центраций в распаханых бассейнах из-за сильного вовлечения карбонатного материала с полей в поверхностный сток. Хорошо известный в гидрологии факт роста поверхностного стока при обезлесении приобретает региональную особенность для ландшафтов с выходами на поверхность карбонатных пород: он сопровождается выравниванием внутригодового режима ряда гидрохимических характеристик. Исследование будет продолжаться в 2018—2019 гг. с наращиванием серии сезонных наблюдений.

## Выводы

1. Сокращение лесных площадей и расширение пахотных и луговых угодий в густорасчлененном агроландшафте приводит к формированию ряда новых эмерджентных свойств геосистем речных бассейнов: переходу вод из кальциевой группы в магниевую, изменению амплитуд колебаний гидрохимических свойств и модуля стока. 2. Создание агроландшафтов в районе исследования приводит к увеличению меженного модуля стока и к уменьшению его изменчивости. 3. Лесной покров способствует сохранению естественных колебаний химического состава вод, обусловленных резкими различиями минерализации в многоводные и меженные периоды. При снижении лесистости ниже 30 % площади бассейна содержание литогенных ионов, определяющих общую минерализацию (гидрокарбонат, кальций, магний), в весеннее половодье и эпизодические летние и осенние паводки, несмотря на сильное разбавление, становится сопоставимым с высокими содержаниями, характерными для меженных периодов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты 17-05-00447, 14-05-00170, 13-05-00821). Авторы выражают благодарность Е. А. Лысенко, К. А. Мерекаловой, А. Э. Малышевой, В. М. Матасову за участие в сборе полевых данных.

## Список литературы

- [1] Авессаломова И. А., Савенко А. В., Хорошев А. В. Ландшафтно-геохимическая контрастность речных бассейнов как фактор формирования ионного стока // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2013. № 4. С. 3—10.
- [2] Акин О. А. Основы гидрохимии. М.: Недра, 1970. 488 с.
- [3] Алексеевский Н. И., Косицкий А. Г., Носань В. В., Христофоров А. В. Подобие рек и их систем // Водные ресурсы. 2013. № 6. С. 531—544.
- [4] Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А. Современные проблемы гидрологии. М.: Академия, 2008. 320 с.
- [5] Корытный Л. М. Геосистемно-гидрологический подход к природно-хозяйственному районированию // География и природные ресурсы. 1987. № 2. С. 152—158.
- [6] Методика измерений массовой концентрации катионов аммония, калия, натрия, лития, магния, стронция, бария и кальция в пробах питьевых, природных (в том числе минеральных) и сточных вод методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель». М.: Фед. служба по надзору в сфере природопользования, 2000. 36 с.
- [7] Молчанов А. А. Оптимальная лесистость. М.: Наука, 1966. 220 с.

- [8] Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
- [9] Федоров В. Н. Ландшафтная индикация формирования речного стока. Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2007. 175 с.
- [10] Хорошев А. В. Ландшафтная структура бассейна р. Заячья (Важско-Северодвинское междуречье, Архангельская область). М., 2005. 158 с. Деп. ВИНТИ 27.09.2005 № 1253-В2005. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/7864329/> (дата обращения 10.06.2018).
- [11] Хорошев А. В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.
- [12] Цыцарин Г. В., Шмидеберг Н. А. Гидрохимический практикум. Общие методы анализа и обработки основных гидрохимических данных. М.: Изд-во МГУ, 1973. 126 с.
- [13] Шайдеггер А. Теоретическая геоморфология. М.: Прогресс, 1964. 452 с.
- [14] Diebel M. W., Maxted J. T., Robertson D. M., Han S., Vander Zanden M. J. Landscape planning for agricultural nonpoint source pollution. Reduction III: assessing phosphorus and sediment reduction potential // *Environmental Management*. 2009. Vol. 43. P. 69—83.
- [15] Baker M. E., Weller D. E., Jordan T. E. Improved methods for quantifying potential nutrient interception by riparian buffers // *Landscape Ecology*. 2006. Vol. 21. P. 1327—1345.
- [16] Ryszkowski L. (Ed.). *Landscape Ecology in Agroecosystems Management*. CRC Press, Boca Raton, London, 2002. 366 p.

Поступила в редакцию 13.06.2018 г.

После доработки 20.11.2018 г.

Принята к публикации 14.12.2018 г.

---

## Relationship between variability of hydrological and hydrochemical properties of runoff and basin landscape structure in the taiga zone

© A. V. Khoroshev,<sup>1</sup> A. N. Lukyanova,<sup>2</sup> A. G. Kositskiy,<sup>3</sup> D. I. Shkolny<sup>4</sup>

Moscow Lomonosov State University, Faculty of Geography

E-mail: <sup>1</sup> avkh1970@yandex.ru

<sup>2</sup> lan22-66-88@mail.ru

<sup>3</sup> alexhydro@mail.ru

<sup>4</sup> thabigd@gmail.com

The research focuses on dependence of inter-year and inter-seasonal variability of hydrological and hydrochemical properties in lower gauge lines of small rivers on landscape structure of a basin as a whole. We used the example of the Zayachya river (Ustyansky district, Arkhangelsk Region) and basins of its tributaries with different shares of forests and cultivated lands to test the hypothesis that certain regional-specific proportions and neighborhoods of land use types ensure low variability of hydrological and hydrochemical regime. We performed measurements in all seasons in 2013—2017 in 15 gauge lines. Correlation analysis showed evidence that decrease in forest areas and increase in arable lands and meadows in the deeply dissected agrolandscape results in new emergent properties of the river basins geosystems: waters shift for calcium to magnesium class, amplitudes of hydrochemical properties fluctuations change as well as that of discharge. Agrolandscapes induce decrease of runoff yearly fluctuations and increase of

discharge. Forest cover supports natural fluctuations of river hydrochemistry due to sharp difference in mineralization between floods and low water periods. Decrease of forest proportion in a basin up to 30 % and lower causes the contents of hydrocarbonates, calcium and magnesium during spring floods to be similar to high content during low water period despite strong dilution.

Key words: runoff, chemical properties, agrolandscape, variability, forest cover, cultivated area, correlation analysis.

## References

- [1] *Avessalomova I. A., Savenko A. V., Horoshev A. V.* Landshaftno-geohimicheskaja kontrastnost' rechnyh bassejnov kak faktor formirovaniya ionnogo stoka // Vestn. MGU. Ser. 5. Geografija. 2013. N 4. S. 3—10.
- [2] *Alekin O. A.* Osnovy gidrohimii. M.: Nedra, 1970. 488 c.
- [3] *Alexeyevskiy N. I., Kositskiy A. G., Nosan V. V., Khristoforov A. V.* Podobiye rek i ih system // Vodniye resursi. 2013. N 6. S. 531—544.
- [4] *Vinogradov Ju. B., Vinogradova T. A.* Sovremennye problemy gidrologii. M.: Akademiya, 2008. 320 s.
- [5] *Korytnyj L. M.* Geosistemno-gidrologicheskij podhod k prirodno-hozhajstvennomu rajonirovaniyu // Geografija i prirodnye resursy. 1987. N 2. S. 152—158.
- [6] Metodika izmerenij massovoj koncentracii kationov ammonija, kalija, natrija, litija, magnija, stroncija, barija i kal'cija v probah pit'evyh, prirodnyh (v tom chisle mineral'nyh) i stochnyh vod metodom kapilljarnogo jelektroforeza s ispol'zovaniem sistemy kapilljarnogo jelektroforeza «Kapel'». M.: Fed. sluzhba po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya, 2000. 36 s.
- [7] *Molchanov A. A.* Optimal'naja lesistost'. M.: Nauka, 1966. 220 s.
- [8] Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnyh vod pri jekologicheskom monitoringe rybohozajstvennyh vodoemov i perspektivnyh dlja promysla rajonov Mirovogo okeana. M.: Izdatel'stvo VNIRO, 2003. 202 s.
- [9] *Fedorov V. N.* Landshaftnaja indikacija formirovaniya rechnogo stoka. Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V. B. Sochavy SO RAN, 2007. 175 s.
- [10] *Horoshev A. V.* Landshaftnaja struktura bassejna r. Zajach'ja (Vazhsko-Severodvinskoe mezhdurech'e, Arhangel'skaja oblast'). M., 2005. 158 s. Dep. VINITI 27.09.2005 № 1253-V2005. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/7864329/> (data obrasheniya 10.06.2018).
- [11] *Horoshev A. V.* Polimasshtabnaja organizacija geograficheskogo landshafta. M.: Tovarišhestvo nauchnyh izdanij KMK, 2016. 416 s.
- [12] *Tsitsarin G. V., Shmideberg N. A.* Gidrohimicheskij praktikum. Obshchie metodi analiza i obrabotki osnovnyh gidrohimicheskikh dannih. M.: Izd-vo MGU, 1973. 126 s.
- [13] *Shaidegger A.* Teoreticheskaya geomorfologiya. M.: Progress, 1964. 452 s.
- [14] *Diebel M. W., Maxted J. T., Robertson D. M., Han S., Vander Zanden M. J.* Landscape planning for agricultural nonpoint source pollution. Reduction III: assessing phosphorus and sediment reduction potential // Environmental Management. 2009. Vol. 43. P. 69—83.
- [15] *Baker M. E., Weller D. E., Jordan T. E.* Improved methods for quantifying potential nutrient interception by riparian buffers // Landscape Ecology. 2006. Vol. 21. P. 1327—1345.
- [16] *Ryszkowski L.* (ed.). Landscape Ecology in Agroecosystems Management. CRC Press, Boca Raton, London, 2002. 366 p.