УДК 911.52(470.11)

А.В. Хорошев[1], А.Г. Косицкий[2], А.Н. Лукьянова[3]

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА АГРОЛАНДШАФТА ЮГА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье исследуется вопрос о влиянии лесистости и распаханности бассейна на гидрологические и гидрохимические характеристики стока на примере малых рек таежной зоны, протекающих полностью или частично в пределах агроландшафта. Цель работы – определить соотношение площадей видов угодий в малом бассейне на юге Архангельской области, которое позволяет поддерживать параметры водной миграции на уровне, близком к региональному фону. С 2013 г. проведена серия из 14 сезонных гидрологических и гидрохимических измерений в 15 створах. Для выявления источников поступления ионов в воды проверялись гипотезы о наличии статистически достоверных связей их концентраций с количественными характеристиками землепользования и рельефом бассейна. Установлено, что в зависимости от года и сезона может меняться не только теснота связи, но и вид зависимости. В вегетационный период во влажные годы повышение лесистости способствовало заметному сокращению модуля стока. Изменчивость модулей меженного стока обратно пропорциональна лесистости. Основной вклад в изменение гидрохимических характеристик стока под действием сельского хозяйства вносит вынос Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, минерального P и NO_3^- плоскостной эрозией на распаханных коренных склонах долин при весеннем снеготаянии. Снижение лесистости бассейнов до 20–25% и распашка изменяют соотношение биогенов в поверхностных водах в сторону снижения содержаний органического P и роста минерального P, NO_3^-, K^+. Развитие экологического каркаса должно предусматривать повышение лесистости малых бассейнов за счет сильнопокатых склонов долин, лощин, дистальных секторов делювиальных шлейфов; это позволит поддерживать химический состав вод и годовой режим стока растворенных веществ на уровне регионального фона.

Ключевыв слова: бассейн, сток, гидрохимические компоненты, агроладшафт, лесистость, распаханность, эмерджентные свойства

Введение. Вопрос об эмерджентных свойствах пространственной структуры ландшафта относится к числу малоисследованных. При планировании землепользования обычной практикой является размещение угодий в соответствии с собственными свойствами того или иного урочища. Однако взаимодействие и пространственные соотношения урочищ и/или хозяйственных угодий могут создавать специфические эффекты, которые влияют на возможности землепользования на удаленных от них территориях. Особенно ярко такие эффекты проявляются в геосистемах типа речных бассейнов.

Одно из немногих проявлений эмерджентности, которое изучалось достаточно подробно, – оптимальная лесистость с точки зрения охраны и регулирования речного стока. Известно, что гидрологические процессы в малых речных бассейнах более зависимы от характеристик лесного массива, чем у средних и больших рек [Ткачев, Булатов, 2002]. Представления об оптимальной лесистости и оптимальном расположении лесов в бассейне расходятся. По одним представлениям (а точнее – в некоторых регионах) существует оптимальный предел лесистости, ниже которого рост лесистости способствует росту водоохранных и водорегулирующих функций, а увеличение лесистости выше оптимального предела, не вызывает значительного роста этих функций [Молчанов, 1966; Михович, 1981]. По другим представлениям существует более или менее линейная связь лесистости с полезными функциями леса по отношению к стоку [Рахманов, 1971]. По третьим – зависимость стока от лесистости носит характер возрастающей функции только до некоторого критического значения. Современное представление о неопределенной или неустойчивой гидрологической функции лесов [Онучин, 2013] сложилось из многочисленных претензий исследователей друг к другу по применяемым методикам измерения показателей стока, испарения, осадков, учету географического положения (широта, высота, степень континентальности и др.) и ландшафтных условий (водопроницаемость грунтов, положение относительно долин и др.), интерпретации полученных результатов, определения фоновых условий (точка отсчета для сравнения).

[1] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail*: avkh1970@yandex.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: alexhydro@mail.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, инженер; *e-mail*: lan22-66-88@mail.ru

В нашей работе мы исследуем вопрос о влиянии лесистости и распаханности бассейна на гидрологические и гидрохимические характеристики на примере малых рек таежной зоны, протекающих полностью или частично в пределах агроландшафта. Основной подход заключается в комбинации возможностей гидрологических и ландшафтно-геохимических методов для выявления связей между характеристиками пространственной структуры ландшафта «на входе» и свойствами потоков вещества «на выходе». Мы исходим из допущения, что существуют критические соотношения площадей элементов бассейновой геосистемы, при которых возникают или исчезают эмерджентные свойства речного стока. В зависимости от установленных критических значений соотношения площадей урочищ и угодий могут расставляться приоритеты землепользования и приниматься планировочные решения о размещении и конфигурации хозяйственных угодий и экологического каркаса.

Цель работы – определить соотношение площадей видов угодий в малом бассейне, которое позволяет поддерживать параметры водной миграции на уровне, близком к региональному фону. Основные вопросы исследования следующие: 1) При каких пороговых значениях ландшафтной структуры бассейна меняется годовой режим стока и фоновое соотношение ионов в водах? 2) Наблюдается ли изменение концентраций ионов в весеннем стоке с полей (на разных этапах севооборота) по сравнению с фоновыми речными водами? 3) В каких бассейнах необходимо изменение структуры угодий и за счет каких урочищ?

Материалы и методы. Исследование проведено в хорошо изученном агроландшафте [Хорошев, 2015; Авессаломова, 2016] в среднетаежной подзоне на юге Устьянского района Архангельской области в бассейне р. Заячья – правого притока р. Кокшеньги (бассейн Ваги). Верхняя часть бассейна представлена моренно-эрозионной заболоченной равниной с редкими выходами пермских мергелей на крутых склонах. Территория покрыта вторичными березово-сосновыми и елово-сосновыми лесами, подвергавшимися активным сплошным рубкам в 1950–1990-е годы; в последние 20 лет ведутся преимущественно выборочные рубки. Нижняя часть расположена в глубокорасчлененной местности, почти полностью распаханной благодаря нетипичному для тайги сочетанию хорошей дренированности и плодородных серогумусовых почв. На склонах долин плодородные почвы формировались на моренных суглинках или коре выветривания мергелей. У подножий склонов расположены широкие делювиальные шлейфы из суглинистого материала, смытого с распахиваемых склонов. Террасы преимущественно цокольные с песчаным чехлом; большинство из них распахивается. В агроландшафте для производства кормов применяется 7-польный севооборот: 1 – однолетние травы (вико-овсяная смесь), 2 – пшеница или ячмень, 3 – пшеница или ячмень с подсевом трав, 4–7 – многолетние травы (клевер, ежа, тимофеевка).

Серия из 14 сезонных гидрологических и гидрохимических измерений в 15 створах наращивается, начиная с января 2013 г. в рамках серии проектов РФФИ. Регулярные измерения проводятся в четырех створах р. Заячья (на выходе из залесенной верхней части бассейна, после впадения притоков с частично залесенными водосборами, после впадения притоков с почти полностью безлесными водосборами, на выходе из агроландшафта), в трех родниках (у подножья распахиваемого коренного склона, у подножья залесенного коренного склона, у подножья склона распахиваемой террасы), в восьми притоках Заячьей. Измерения проводятся в зимний (начало февраля), весенний (конец апреля), летний (июль или август), осенний (конец октября или начало ноября) периоды. В 2017 г. летние измерения проведены дважды: во время июльского паводка и августовской межени. В периоды весеннего половодья и во время сильного летнего паводка (2017 г.) проводилось дополнительное гидрохимическое опробование в 30 временных водотоках. Гидрологические и гидрохимические характеристики реки Заячьей и ее притоков в залесенной части принимались за фоновые.

Измерения концентраций ионов проводились следующими методами: определение содержания гидрокарбонатов – объемным ацидометрическим методом [Цыцарин, Шмидеберг, 1973], определение остальных основных ионов – на системе капиллярного электрофореза «Капель» [Методика …, 2000], концентрации минерального и валового фосфора определялись на спектрофотометре методом Морфи-Райли [Руководство …, 2003].

Для выявления источников поступления ионов в воды проверялись гипотезы о наличии статистически достоверных связей их концентраций с количественными характеристиками пространственной структуры бассейна (доля видов угодий, доля склоновых поверхностей), с модулем стока отдельно для влажных и сухих лет, для паводковых и меженных периодов. Кроме того, проверялась гипотеза, что при сопоставимых характеристиках бассейна концентрация ионов зависит от года севооборота, т. е. от распределения пахотных угодий в конкретный год наблюдения. Для исследования этих зависимостей применены корреляционный (непараметрические корреляции Спирмена), дисперсионный, регрессионный, кластерный анализ, а также графическая визуализация. Для исследования источников поступления макроэлементов и микроэлементов в воды использовались данные почвенного опробования пахотных и подпахотных горизонтов и почвообразующей породы в 30 катенах.

Результаты. Характеристики исследованных бассейнов представлены в табл. 1. Меженные расходы воды определяются уровнем грунтовых вод. Они слабо меняются в течение меженного периода, что позволяет сравнивать расходы воды разных водотоков. Из 14 серий пять пришлись на период устойчивой межени. Для каждого створа рассчитаны условно меженные расходы воды $Q_{у.м.}$ как про-

Таблица 1

Результаты меженных гидрологических измерений на реках бассейна р. Заячья

Название водотока	Площадь бассейна, км^2	Порядок реки	Лесистость, %	Распаханность, %	Доля луговых угодий, %	Доля селитебных и нарушенных земель, %	Доля крутых склонов, %	Расход Qу.м., л/с	Модуль стока, л/с·км^2
р. Заячья д. Орюковская	57,8	4,9	65,33	0,23	0,64	0,04	8,43	115	2,0
р. Заячья, с. Заячьерицкий Погост	84,3	5,8	57,47	6,83	5,70	0,67	8,62	190	2,3
р. Заячья, д. Ульяновская	122	6,3	47,62	18,37	11,89	2,95	6,69	399	3,3
р. Стругница	8,03	3,3	75,92	1,74	7,21	0,75	7,19	13,3	1,7
р. Козловка	2,52	1,0	33,89	20,3	11,93	0,00	7,02	0,80	0,7
р. Межница Заячьерецкая	10,6	3,0	35,44	23,8	18,23	1,91	8,76	41,9	4,0
Родник, правый приток р. Межница Заячьерецкая	0,11	1,0	нет данных					1,6	14,7
руч. Становской балки	1,60	1,0	8,26	81,9	18,27	2,83	10,35	7,1	4,5
р. Смутиха	2,31	1,0	11,24	64,0	20,61	7,66	9,47	7,8	4,3
р. Мозголиха	3,05	2,0	29,03	55,0	14,83	7,38	3,44	8,3	2,7
руч. Камешница	2,75	1,0	4,19	35	43,58	38,10	5,88	8,6	3,1
р. Межница	17,6	4,0	41,85	30,8	21,71	3,97	4,22	68,2	3,9

стое осреднение расходов воды за эти пять измерений.

Условно характерные меженные расходы воды находятся в тесной зависимости от порядков рек N, определяемых методом А. Шайдеггера как

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

где P – количество водотоков первого порядка в бассейне реки.

Под водотоком первого порядка понимается река, не имеющая притоков. Значения N для исследуемых створов меняются от 1 для пяти самых маленьких водотоков до 6,3 для р. Заячья в замыкающем створе у д. Ульяновская. Соотношение $Q_{у.м.}$ и N представлены на рис. 1, А. Наибольший разброс значений характерен для рек первого порядка, что связано с сильной индивидуальностью малых рек. С ростом N зависимость становится более тесной и для всех рек с $Ne \geq 4$ фактические значения $Q_{у.м.}$ отличаются от снятых с кривой не более чем на 25%.

Неоднозначность зависимости $Q_{у.м.}$ от N объясняется влиянием ряда других факторов на формирование стока рек. Для оценки их влияния исследованы закономерности распределения модулей стока. Значения $M_{у.м.}$ рек меняются в диапазоне от 0,7 до 4,5 л/с км^2. Сопоставление модулей стока с лесистостью и распаханностью водосборов водотоков представлено на рис. 1, Б, В.

В зависимости от года и сезона может меняться не только теснота связи, но и вид зависимости. Так, в весеннее половодье 2013 г. наблюдалась сильная прямая связь лесистости и модуля стока с коэффициентом корреляции Спирмена (**ККС**) –0,87. Во влажное лето 2016 и 2017 гг., как и в зимнюю межень 2013 г., связь была отрицательной (ККС, соответственно, –0,66, –0,55, –0,67). В осенние сезоны достоверная связь отсутствовала. Среднеквадратическое отклонение модулей меженного стока (за летний и осенний периоды) в целом обратно пропорционально лесистости. Исключение представляет створ р. Заячья на выходе из залесенной верхней части бассейна с высокой изменчивостью модуля стока (рис. 2, А). Если включить в массив данных серию весенних наблюдений, то, наоборот, с ростом лесистости возрастает изменчивость модулей стока (ККС 0,92) (рис. 2, Б).

Все исследуемые водотоки по классификации О.А. Алекина [1970] относятся к гидрокарбонатному классу, кальциевой или магниевой группе. В верхнем течении реки Заячьей, где сохранились олиготрофно-болотные и хвойнолесные урочища, воды имеют невысокую минерализацию от 30–60 мг/л в половодье до 200–400 мг/л в зимнюю межень. От верхнего до нижнего створа минерализация вод р. Заячьей повышается в 2–3 раза. Содержание гидрокарбонатов колеблется около 40%, а кальция и магния – по 25% от всего солевого состава [Лукьянова, 2015]. Бассейны верхнего слабодренированного сектора бассейна почти всегда характеризуются превышением Ca над Mg, нижнего дренированного сектора – чаще наоборот. При господстве поверхностного стока во время снеготаяния источник Ca и Mg общий – размываемые почвы крутых склонов, карбонатные с глубины 110–150 см в лесном секторе, с глубины 0–20 см (за счет смыва поверхностных горизонтов) – в обезлесенном (рис. 3, А). В зим-

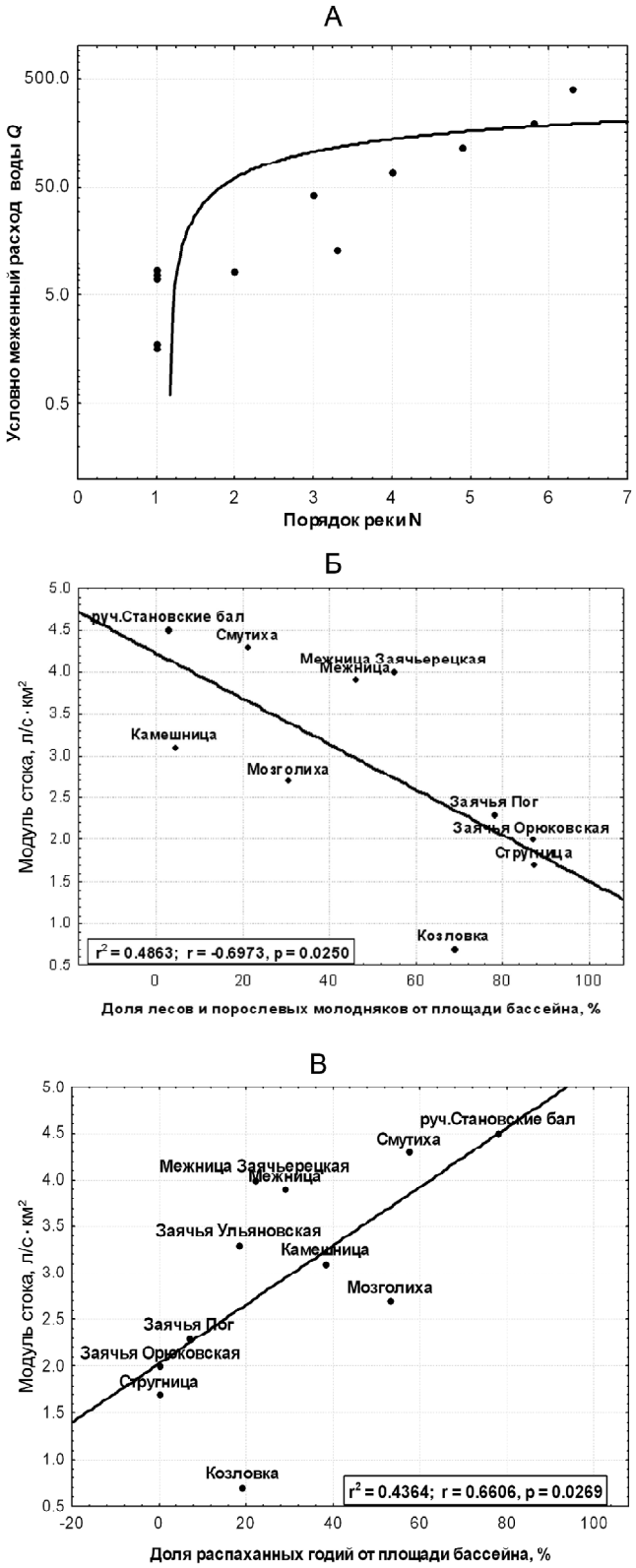

Рис. 1. Характеристики условных меженных расходов и модулей стока рек бассейна р. Заячьей. А – соотношение условно характерных меженных расходов воды и порядков рек. Б – зависимость модуля стока от залесенности. В – зависимость модуля стока от распаханности водосборов рек

Fig. 1. Parameters of the relative low-water run-off modules for the rivers in the Zayachya River basin. A – Correlation of the relative characteristic low-water run-off modules with stream orders. Б – Correlation with the forest coverage of river drainage basins. B – Correlation with the percentage of arable lands in the river drainage basins

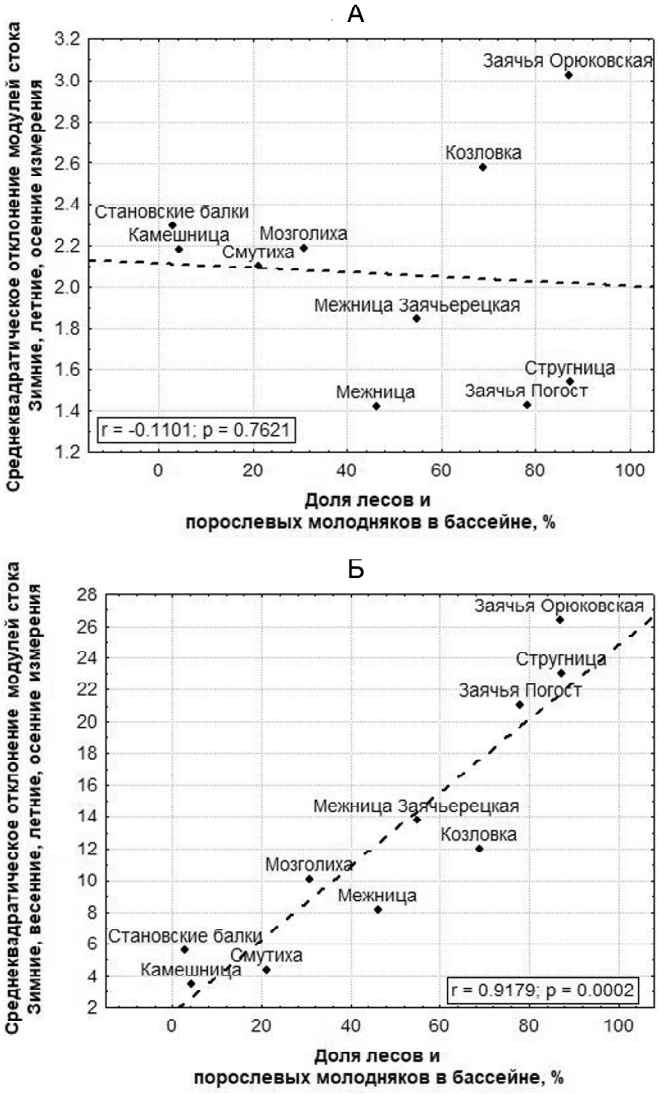

Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного отклонения модулей стока от лесистости: А – за зимние, летние и осенние периоды, Б – с учетом весенних наблюдений

Fig. 2. Dependence of the standard deviation of run-off modules on the forest coverage: A – during winter, summer and autumn periods; Б – with account of spring observations

нюю межень при высокой доле подземного питания, корреляция содержаний Ca и Mg отсутствует. Это свидетельствует о наличии разных источников Mg и Ca в грунтовом стоке – соответственно, из мергелей и из московской карбонатной морены. Например, зимний сток р. Межница Заячерецкая обогащен Mg^{2+} (36 мг/л), по сравнению с р. Межница (18 мг/л), что согласуется с повышенной долей крутых сложенных мергелями склонов (соответственно, 29% и 19%) при меньшем размере бассейна. Более высокое содержание Ca^{2+} в зимнюю межень характерно для бассейнов с повышенной долей плоских и пологих поверхностей, сложенных мощным чехлом моренных суглинков (Стругница, Межница Заячерецкая, Межница, Мозголиха – 74–78 мг/л), чем в бассейнах с небольшой долей таких поверхностей (Становская, Смутиха, Козловка – 54–65 мг/л).

Для остальных ионов установлена более слабая связь с особенностями морфолитогенной основы и более существенная – с соотношением видов земельных угодий.

Мультирегрессионные уравнения (метод прямого пошагового выбора при F=1) показали, что содержание HCO_3^- во влажном июне 2017 г. на 96% описывается долей безлесных территорий и долей склонов крутизной более 8° в бассейне, соответствующих выходам мергелей на поверхность за счет смыва почв. Чуть хуже (на 91%) объясняется содержание SO_4^{2-} при достоверном вкладе доли безлесных территорий, на 88% – Ca^{2+} (пашни и луга), на 88% Mg^{2+} (леса и зарастающие залежи, крутые склоны), на 82% –органического фосфора (пашни, луга, склоны). Основной смыв почв с обрабатываемых частей водосборов происходит в периоды с повышенным модулем стока. Поэтому минимально необходимое значение лесистости определялось именно по весенним периодам (2013, 2015 гг.) и по летним измерениям во влажные годы (2014, 2017 гг.). За оптимальную принималась такая лесистость бассейна, при которой концентрации гидрохимических компонентов стока не выходят за пределы регионального фона. Оказалось, что региональный фон содержания HCO_3^- в малых реках в паводковые периоды (до 100 мг/л), Ca^{2+} (до 20 мг/л), Mg^{2+} (до 15 мг/л) сохраняется при лесистости более 40%. При лесистости менее 40% и сопоставимой площади бассейна концентрации могут быть выше фоновых в 2–6 раз. При проектировании экологического каркаса именно на такие значения следует опираться при корректировке пропорций угодий.

Установлена зависимость гидрохимических компонентов стока от характера использования сельскохозяйственных угодий в конкретный год севооборота. Так, весной 2013 г. сток из распаханного под зиму водосбора Захаровской балки имел повышенное содержание Ca^{2+} и минерального фосфора по сравнению с сопоставимыми по площади и ландшафтной структуре водосборами логов левобережья Заячьей, покрытыми стерней многолетних трав (табл. 2). Такая закономерность отмечалась и в литературе [Науменко, 2007]. Талые воды с полей, скапливающиеся в ловушках в аккумулятивных позициях на террасах также различаются в зависимости от года севооборота: сток с полей под многолетними травами по левобережью Смутихи отличается пониженным содержанием NO_3^- и органического P по сравнению со стоком с зяблевых полей на правобережье Межницы Заячерецкой (табл. 2). Весенние концентрации ионов K^+ во временных водотоках в распаханных под зиму балках (Захаровская), наоборот, меньше (0,6 мг/л), чем с полей под стерней и многолетними травами (ежа, тимофеевка, клевер) (1,5–3,6 мг/л). Это свидетельствует о частично биогенном источнике K^+ в талых водах. Во время летнего паводка 2017 г. в притоках Заячьей наблюдалась обратная корреляция содержания K^+ с лесистостью (коэффициент Спирмена составил –0,52).

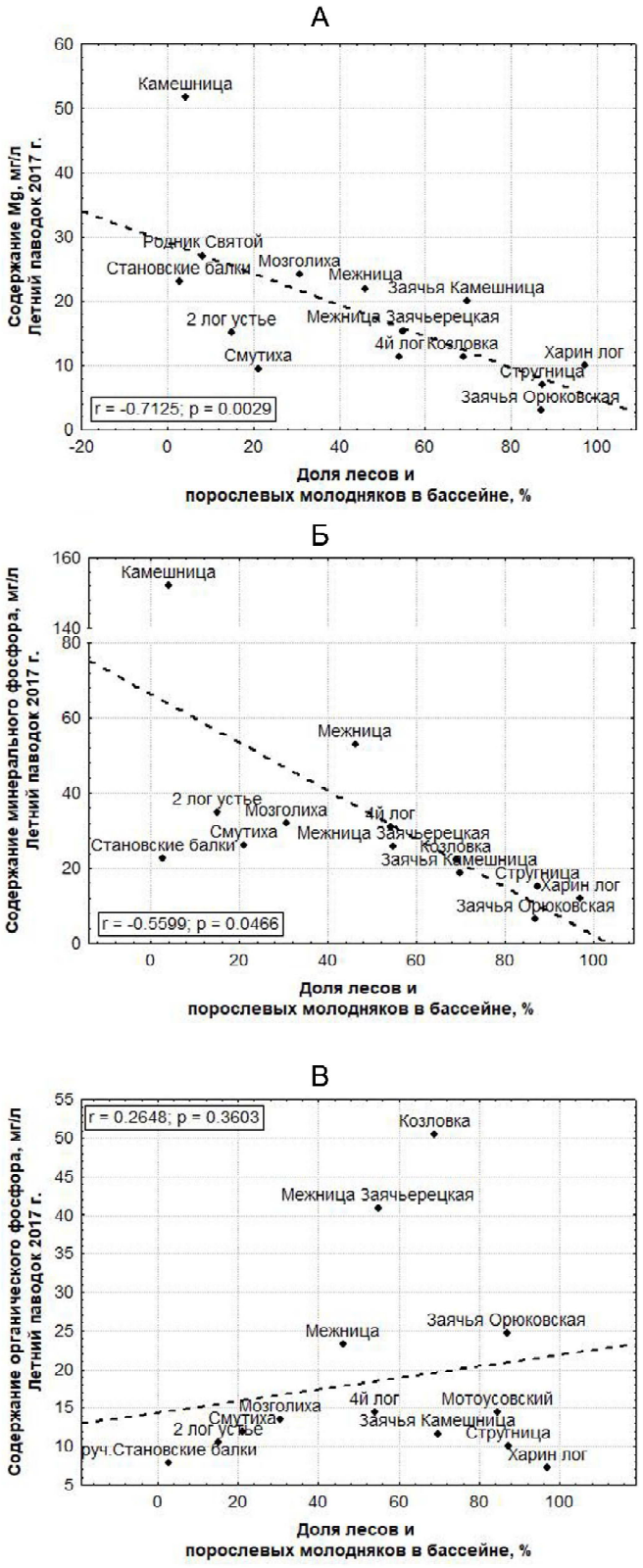

Рис. 3. Зависимость содержания магния (А), минерального фосфора (Б), органического фосфора (В) в летний паводок 2017 г. от лесистости бассейна

Fig. 3. Dependence of Mg (A), P min (Б) and P org (B) concentrations during 2017 summer high-water on the forest coverage in the basin

Таблица 2

Химический состав временных весенних водотоков в зависимости от этапа севооборота

Характеристика водосбора	Минеральный фосфор, мкг/л	Органический фосфор, мкг/л	Нитраты, мг/л	Кальций мг/л
Геохимические ловушки на террасах, примыкающих к крутым склонам				
Сток с поля под многолетними травами, левый борт долины р. Смутихи	248	24	0	18
Сток с поля под зябью, левый борт долины Межницы Заячерецкой	152	46	25	32
Временные водотоки по лощинам				
Лощины (три) левого борта долины р. Заячьей, бассейн под многолетними травами	29–93	35–43	0–3	4–5
Лощина Захаровская, бассейн под зябью	143	65	7	7

Известно, что при распашке резко возрастает доля подвижных минеральных форм фосфора в первичной гидрографической сети, увеличивается вынос фосфора в водные объекты в легко доступной для водных организмов минеральной форме [Науменко, 2007; Ивичева, Филоненко, 2017]. Из бассейнов с повышенной лесистостью (Стругница, Межница) весной выносится меньше Mg^{2+} (рис. 3, А) и минерального Р (рис. 3, Б), но больше органического фосфора по сравнению с распаханными. При росте лесистости бассейна выше 20 % наблюдается резкий скачок содержания органического фосфора (рис. 3, В).

Влажным летом 2014 г. наблюдалась обратная корреляция Спирмена между содержанием NO_3^- и органического фосфора (r = –0,58) в поверхностных водах: фосфор выносился в повышенных количествах реками с повышенной лесистостью бассейна, а NO_3^- – с низкой лесистостью и высокой распаханностью. NO_3^- и минеральный фосфор, наоборот, обычно связаны положительной корреляцией (r=0,58–0,67 в разные сезоны), что доказывает их общий антропогенный источник – внесение минеральных удобрений. В весенний и осенний паводки при лесистости более 40% наблюдается заметное снижение концентраций NO_3^- (до 2 мг/л и менее); в зимнюю и летнюю межень закономерность отсутствует.

Реки 3-го порядка Стругница и Межница Заячерецкая сопоставимы по площади бассейна, доле склоновых поверхностей и доле крутых склонов, но бассейн Межницы Заячерецкой вовлечен в сельское хозяйство, а бассейн Стругницы в результате забрасывания полей на склонах и террасах может считаться фоновым с высокой степенью лесистости. Распаханный бассейн отличается во все годы и сезоны заметно более высокими концентрациями HCO_3^-, Mg^{2+}, Cl^-, NO_3^-, K^+, минерального фосфора. На залесенных крутых склонах долины Стругницы, сложенных мергелями, Mg^{2+} удерживается лесным покровом в почвах. Содержание ионов в двух бассейнах сближаются в засушливые летние сезоны, но отличаются во влажные, что доказывает вклад смыва почв с распаханных склонов.

Обсуждение результатов. Влияние лесистости на модуль стока в малых бассейнах оказалось неоднозначным в зависимости от сезона и погодных условий конкретного года. В вегетационный период во влажные годы повышение лесистости способствовало заметному сокращению модуля стока. Это объясняется высокой долей вторичных березово-сосновых, березово-осиновых лесов, находящихся в возрасте максимальной продуктивности (30–40 лет), которая соответствует максимальному расходу на транспирацию [Крестовский, 1986]. В период весеннего половодья рост лесистости, наоборот, способствовал росту модуля стока. Изменчивость модулей стока (с учетом данных за все сезоны) также прямо пропорциональна лесистости. Основная причина видится в том, что наблюдения в течение короткого периода фактически зафиксировали разные фазы снеготаяния в залесенных и распаханных бассейнах. Наличие значительной доли леса в бассейне «разводит» волны паводка во времени. Особенно благоприятно для выравнивания стока преобладание лесов в верхней части бассейна, а полей в нижней [Дубах, 1951], что и наблюдается в бассейне р. Заячья.

Поясним механизм значительного превышения модуля стока в конце апреля в лесистых бассейнах по сравнению с распаханными. На полях снег оставался лишь в прибровочных позициях и на склонах холодных экспозиций, а в лесах – сохранялся в большинстве местоположений и активно таял. Соотношение поверхностного и подземного стока сильно различалось. На полях промерзание сохранялось только непосредственно под нестаявшими «снежниками» и на расстоянии первых метров от их края. По мере таяния снега почва оттаивала в течение первых дней, и поверхностный сток из снежника вниз по склону на полях со стерней и на зяби формировался на очень короткое время, а затем фильтровался в оттаявшую почву. Бурный сток из коротких балок на склонах со снежным покровом в верхней части полностью исчезал за одни сутки в результате быстрого оттаивания почвы и перехода в подземный сток. На поздно освобождающихся от сне-

га восточных и северных склонах сток из снежников приводораздельной части доходил до русла ближайшей малой реки в результате быстрого насыщения влагой оттаявшего верхнего слоя почвы мощностью 5–10 см и на глазах формировал эрозионные борозды на глубину оттаивания. Таков основной механизм избыточного поступления в реки веществ, смываемых с пашни. На выпуклых участках пахотный слой полностью смыт, кора выветривания мергелей вовлекается в эрозию. В бассейнах с сосново-еловыми лесами почва, освобожденная от снега, часто еще остается промерзшей, т. е. в силу затенения формирующийся поверхностный сток полностью проходит путь по склонам по промерзшей почве. Даже на южном склоне одной из залесенных балок, уже свободном от снежного покрова, почва в конце апреля оттаяла всего на 5–7 см. Таким образом, сток в лесных бассейнах был больше, чем в распаханных не только из-за запаздывания снеготаяния, но и из-за более медленного оттаивания почвы, хотя промерзание практически всегда более глубокое на открытых участках. Промерзание на полях в феврале 2013 г. обычно составляло 35–50 см (на выпуклых возвышенных участках достигало 80 см), в лесах – 15–25 см.

Для Mg^{2+}, Ca^{2+}, HCO_3^- решающим фактором служит соотношение поверхностных отложений в бассейне, которое находит четкое отражение в доле крутых склонов. Однако землепользование может искажать вклад геологического фактора. Для поддержания фоновых гидрохимических условий целесообразны мероприятия по регулированию пропорций и расположения хозяйственных угодий, а именно – лесных и сельскохозяйственных. За счет каких именно урочищ целесообразно повышать лесистость или, по крайней мере, заменять пахотные угодья на луговые, определяется на следующих этапах планирования посредством катенарного подхода. Ранее с применением почвенно-геохимических и биогеохимических данных было показано, что при отсутствии естественных буферных элементов рельефа регулирование нежелательных потоков с распаханных склонов может быть достигнуто за счет буферных лесокустарниковых полос в дистальной части делювиальных шлейфов, в нижней части лощин [Хорошев, 2015].

Поступление в водотоки гидрохимических компонентов, зависящих от антропогенных и биогенных процессов (минеральный и органический P, NO_3^-, K^+), может регулироваться технологическими мерами либо биогеохимическими барьерами. Минерализация растительных остатков весной в лесах в меньшей степени является источником K^+ в водах, чем минерализация остатков культурной растительности. О вкладе внесения удобрений в обогащение вод K^+ свидетельствуют высокие положительные корреляции с содержанием минерального P весной 2013 г. и летом 2014 г.

Классификация водотоков по совокупности химических свойств воды за все даты измерений методом кластерного анализа (метод дальнего соседа по метрике Евклида) объединяет р. Козловка в одну группу с р. Стругница (наиболее «чистая» река агроландшафта) и р. Межница Заячерецкая. Общая особенность бассейнов состоит в сходстве структуры угодий: доля пашни не превышает 25%, а лесистость превышает 50%. Эти показатели структуры угодий в бассейне можно считать поддерживающими естественный гидрохимический режим, но их достижение в агроландшафте мало реалистично. Однако основной вклад в искажение фоновых гидрохимических характеристик вносит не распашка как таковая, а смыв почв и мергелей с крутых склонов, особенно при их малой удаленности от пойм (в пределах 100–200 м). Повышение лесистости бассейнов рек 1-го порядка с современных 4–11% до 20–25% вполне достижимо за счет только сильнопокатых и крутых склонов долин, а также лощин и водосборных бассейнов родников, через которые происходит разгрузка грунтовых вод на поймы рек. Компенсация утраченной пашни возможна за счет повторной распашки заброшенных урочищ делювиальных шлейфов (весьма плодородных за счет привноса элементов минерального питания и гумуса со склонов) и террас. Выбор урочищ для повышения лесистости диктуется следующими двумя соображениями. Во-первых, урочища плоских дренированных водораздельных поверхностей, пологих делювиальных шлейфов и плоских террас востребованы в земледелии и вносят малый вклад в искажение фоновых характеристик стока. Во-вторых, урочища крутых склонов долин характеризуются интенсивной плоскостной эрозией, вносящей основной вклад в искажение фоновых характеристик стока, и при этом дают низкую урожайность на смытых почвах. В зависимости от ландшафтной структуры бассейна изменение землепользования может иметь несколько вариантов (рис. 4).

При лесистости 4–11% (рр. Камешница, Смутиха, Становская балка) и высокой доле крутых распахиваемых склонов приближение к фоновым гидрохимическим параметрам достигается повышением лесистости за счет склоновых урочищ. Неблагоприятная особенность строения этих долин заключается в непосредственном примыкании склонов долин на многих участках к пойме, малом развитии буферной лесокустарниковой растительности на пойме и в дистальных секторах узких делювиальных шлейфов. При этом лесопосадки будут многофункциональными и не только позволят предотвратить смыв почв, но и станут буфером на пути бытового загрязнения от д. Нагорская, расположенной в верховьях. Также создадутся дополнительные местообитания для ряда видов птиц и млекопитающих, использующих, по данным Л.Г. Емельяновой, «островные» лесные местообитания агроландшафта (иволга, вертишейка, обыкновенная полевка, полевая мышь, кабан). Часть заброшенных делювиальных шлейфов могут быть вовлечены в повторную распашку при условии изменения направления пахоты. Вместо полей, охватывающих склоны, делювиальные шлейфы и террасы с направлением пахоты вниз по склону перпендикулярно реке, предлагается

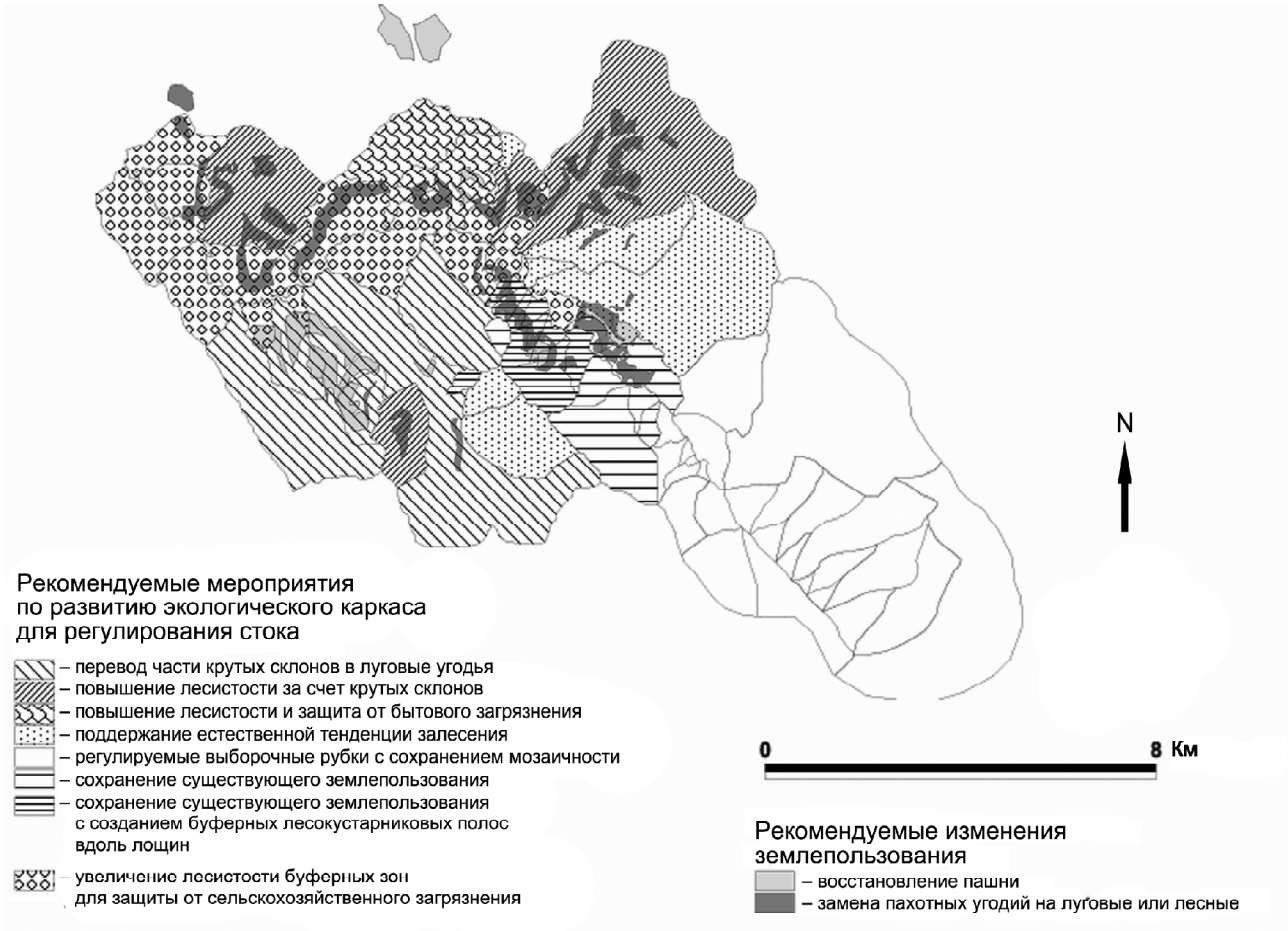

Рис. 4. Рекомендуемые ландшафтно-планировочные решения в бассейнах р. Заячья и ее притоков для регулирования стока воды, наносов и растворенных веществ

Fig 4. Recommendations on the landscape-planning decisions aimed at the control of water, sediment and dissolved solids discharge in the Zayachya River basin and the basins of its tributaries

формирование участков вдоль делювиальных шлейфов параллельное реке. При лесистости 29–42% и большей ширине днища долины (рр. Мозголиха, Межница Заячерецкая, Козловка, Межница) водотоки лучше защищены от привноса избыточных наносов и растворенных веществ со склонов, прежде всего – на участках с террасами, отделяющими делювиальный шлейф от поймы. В таких бассейнах склоны необязательно подлежат залесению, но предпочтительна замена зернотравяного севооборота на сенокосно-пастбищный с более редкой распашкой. Это позволит сократить вынос поллютантов с полей. Усиление экологического каркаса может быть осуществлено посредством расширения лесокустарниковых полос по прибровочным частям террас или делювиальных шлейфов (если последние полностью перекрывают террасу), а также по лощинам, где требуется восстановление кустарниково-высокотравного покрова вдоль тальвега. Бассейны с благополучными показателями лесистости (р. Стругница) в результате интенсивного зарастания полей сосной и березой приближаются к фоновым гидрохимическим параметрам, что позволяет рекомендовать поддержание существующей естественной тенденции.

Выводы:

– основной вклад в изменение гидрохимических характеристик стока под воздействием сельского хозяйства вносит вынос Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, минерального P, NO_3^- плоскостной эрозией на распаханных коренных склонах долин особенно при весеннем снеготаянии. При росте распаханности бассейнов возрастает вклад вод, имеющих контакт с коренными мергелями и снижается вклад вод, формирующихся в моренах;

– снижение лесистости бассейнов до 20–25% и распашка изменяют соотношение биогенов в поверхностных водах в сторону снижения содержаний органического P и роста минерального P, NO_3^-, K^+. Годовой режим органического P становится более равномерным, чем в залесенных бассейнах, при стабильно низких содержаниях;

– развитие экологического каркаса должно предусматривать повышение лесистости малых бассейнов за счет сильнопокатых склонов долин, лощин, дистальных секторов делювиальных шлейфов; это позволит поддерживать химический состав вод и годовой режим стока растворенных веществ на уровне регионального фона.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-05-00447, 14-05-00170, 13-05-00821). Авторы выражают благодарность Д.И. Школьному, Е.А. Лысенко, К.А. Мерекаловой, А.Э. Малышевой, В.М. Матасову, Л.Г. Емельяновой за участие в сборе полевых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авессаломова И.А. Биогеохимическая неоднородность агроландшафтов (на примере среднетаежной подзоны юга Архангельской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 58–66.

Алекин О.А. Основы гидрохимии. М.: Недра, 1970. 488 с.

Дубах А.Д. Лес как гидрологический фактор. Л.: Гослесбумиздат, 1951. 160 с.

Ивичева К.Н., Филоненко И.В. О влиянии освоенности водосбора реки Верхней Сухоны (Вологодская область) на химический состав вод ее притоков // Принципы экологии. 2017. № 3. С. 81–92.

Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 120 с.

Лукьянова А.Н. Особенности гидрохимического режима малых рек в бассейне р. Заячья (Архангельская область) // Материалы научной конференции с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Часть 1. Ростов-на-Дону, 2015. С. 155–159.

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.

Михович А.И. Водоохранные лесонасаждения. Харьков: Прапор, 1981. 64 с.

Молчанов А.А. Оптимальная лесистость. М.: Наука, 1966. 220 с.

Науменко М.А. Эвтрофирование озер и водохранилищ. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 100 с.

Онучин А.А. Локальные и региональные контрасты гидрологических функций лесных экосистем // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. М.: Т-во научных изданий КМК, 2013. С. 259–264.

Рахманов В.В. Влияние лесов на водность рек в бассейне Верхней Волги. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 175 с.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Издательство ВНИРО, 2003. 202 с.

Ткачев Б.П., Булатов В.И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы. Аналитический обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2002. 114 с.

Хорошев А.В. Ландшафтно-геохимические основания планирования экологического каркаса агроландшафта (на примере среднетаежного ландшафта в Архангельской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 19–27.

Цыцарин Г.В., Шмидеберг Н.А. Гидрохимический практикум. Общие методы анализа и обработки основных гидрохимических данных. М.: Изд-во МГУ, 1973. 126 с.

Поступила в редакцию 20.04.2018
После доработки 24.03.2019
Принята к публикации 15.04.2019

A.V. Khoroshev[1], A.G. Kositskiy[2], A.N. Lukyanova[3]

HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL RATIONALES FOR DESIGHNING THE ECOLOGICAL NETWORK IN AGROLANDSCAPE OF THE SOUTHERN PART OF ARHANGELSK OBLAST

The paper focuses on the influence of proportion of forest cover and arable lands on hydrological and hydrochemical properties of runoff for small rivers in the taiga zone flowing entirely or partially within agrolandscapes. The objective of the research was to determine ratio of land use types in a small basin that supports water migration parameters close to the background conditions. Since 2013 fourteen seasonal measurements of runoff and hydrochemical properties in 15 gauge lines were performed. To reveal matter sources the hypotheses about statistically significant linkages between ions concentration and quantitative parameters of land use and relief in a basin were tested. The linkage density and type of relationship can vary depending on year and season. During vegetation period in wet years the higher forest cover results in decrease of runoff modulus. Variability of runoff modulus is inversely related to the proportion of forest cover. Agriculture contributes to changes in hydrochemical properties by means of surface erosion on plowed slopes which results in the input of Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, mineral P, and NO_3^- during snowmelt. Forest cover less than 20–25% and plowing encourage the change in biogenic elements ratio in surface water with decrease of organic P and increase of mineral P, NO_3^- and K^+ concentrations. Improvement of ecological network should be aimed at the increase of forest cover in small basins at the expense of steep valley slopes, gullies, and distal sectors of deluvial fans. This would sustain the chemical composition of water and annual runoff of dissolved substances close to regional background conditions.

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: avkh1970@yandex.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, PhD. in Geography; *e-mail*: alexhydro@mail.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Engineer; *e-mail*: lan22-66-88@mail.ru

Key words: basin, landscape structure, forest percentage, field percentage, runoff modulus, hydrochemical attributes, seasonal variability

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Fundamental Research (projects № 17-05-00447, 14-05-00170, 13-05-00821). The authors are grateful to D.I. Shkolny, E.A. Lysenko, K.A. Merekalova, A.E. Malysheva, V.M. Matasov and L.G. Emelyanova for their participation in field data acquisition.

REFERENCES

Alekin O.A. Osnovy gidrohimii. (Fundamentals of hydrochemistry] M.: Nedra, 1970. 488 c. (In Russian)

Avessalomova I.A. Biogeohimicheskaja neodnorodnost' agrolandshaftov (na primere srednetaezhnoj podzony juga Arhangel'skoj oblasti) [Biogeochemical diversity of agrolandscapes (case study of middle-taiga subzone in the southern Arkhangelsk region] // Vestnik Moskovskogo un-ta. Serija 5: Geografija. 2016. № 3. S. 58–66. (In Russian)

Cycarin G.V., Shmideberg N.A. Gidrohimicheskij praktikum. Obshhie metody analiza i obrabotki osnovnyh gidrohimicheskih dannyh [Hydrochemical workshop. General methods of analysis and processing of principal hydrochemical data]. M.: Izd-vo MGU, 1973. 126 s. (In Russian)

Dubah A.D. Les kak gidrologicheskij factor [Forest as a hydrological factor]. L.: Goslesbumizdat, 1951. 160 s. (In Russian)

Horoshev A.V. Landshaftno-geohimicheskie osnovanija planirovanija jekologicheskogo karkasa agrolandshafta (na primere srednetaezhnogo landshafta v Arhangel'skoj oblasti) [Landscape-geochemical rationales for planning ecological network in agrolandscape (case study of a middle-taiga landscape in the Arkhangelsk region)] // Vestnik Moskovskogo un-ta, serija 5 geografija. 2015. № 6. S. 19–27. (In Russian)

Ivicheva K.N., Filonenko I.V. O vlijanii osvoennosti vodosbora reki Verhnej Suhony (Vologodskaja oblast') na himicheskij sostav vod ee pritokov [Influence of anthropogenic management of the upper Sukhona basin on hydrochemistry of tributaries] // Principy jekologii. 2017. № 3. S. 81–92. (In Russian)

Krestovskij O.I. Vlijanie vyrubok i vosstanovlenija lesov na vodnost' rek (influence of cutting and forest regeneration on runoff]. L.: Gidrometeoizdat. 1986. 120 s. (In Russian)

Luk'janova A.N. Osobennosti gidrohimicheskogo rezhima malyh rek v bassejne r. Zajach'ja (Arhangel'skaja oblast') [Peculiarities of hydrochemical regime of small rivers in the Zayachya river basin (Arkhangelsk region)] // Materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye problemy gidrohimii i monitoringa kachestva poverhnostnyh vod». Chast' 1. Rostov-na-Donu, 2015. S. 155–159. (In Russian)

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'» (Method for measuring mass concentration of kations of ammonium, potassium, sodium, lithium, magnesium, strontium, barium and calcium in samples of drinking, natural (including mineral) and waste waters by capillary electrophoresis using the «Kapel'» system of capillary electrophoresis]. M.: Fed. sluzhba po nadzoru v sfere prirodopol'zovanija, 2000. 36 s. (In Russian)

Mihovich A.I. Vodoohrannye lesonasazhdenija [Water-protecting forest stands]. Har'kov: Prapor, 1981. 64 s. (In Russian)

Molchanov A.A. Optimal'naja lesistost' [Optimal forest cover]. M.: Nauka, 1966. 220 s. (In Russian)

Naumenko M.A. Evtrofirovanie ozer i vodohranilishh [Eutrophication of lakes and water reservoirs]. SPb.: Izd-vo RGGMU, 2007. 100 s. (In Russian)

Onuchin A.A. Lokal'nye i regional'nye kontrasty gidrologicheskih funkcij lesnyh jekosistem [Local and regional contrasts of hydrological functions of forest ecosystems] // Raznoobrazie i dinamika lesnyh jekosistem Rossii. Moskva: T-vo nauchnyh izdanij KMK, 2013. S. 259–264. (In Russian)

Rahmanov V.V. Vliyanie lesov na vodnost' rek v bassejne Verhnej Volgi [The influence of forests on the water content of rivers in the Upper Volga basin.]. L.: Gidrometeoizdat, 1971. 175 p.

Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskih i presnyh vod pri ekologicheskom monitoringe rybohozjajstvennyh vodoemov i perspektivnyh dlja promysla rajonov Mirovogo okeana [Manual on chemical analysis of sea and fresh waters for ecological monitoring of fishing water bodies and fishing-perspective regions of World Ocean]. M.: Izdatel'stvo VNIRO, 2003. 202 s. (In Russian)

Tkachev B.P., Bulatov V.I. Malye reki: sovremennoe sostojanie i ekologicheskie problemy. Analiticheskij obzor [Small rivers: present-day state and ecological problems. Analytical review]. Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2002. 114 s. (In Russian)

Receieved 20.04.2018
Revised 24.03.2019
Accepted 15.04.2019