

ЗИМНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ РЕК УСТЬЯНСКОГО УЧЕБНО-НАУЧНОГО ПОЛИГОНА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

***Большаков Д.В., Буторин З.С., Вахрушев Р.И., Виногоров А.А.,
Гнатюк С.В., Жуков И.А., Зайцев В.А., Косицкий А.Г.,
Лукьянова А.Н., Орлова А.А., Подчерзцева С.Б.,
Повалишников Л.В., Повалишникова Е.С., Соболев И.К.,
Шерементьев И.А., Шумаев Р.В., Щинова К.О.***

Кафедра гидрологии суши

Введение. Зимние полевые исследования проходили с 26 января по 5 февраля 2025 г. в Устьянском районе Архангельской области на территории учебно-научного полигона географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Целью работ стало выявление закономерностей формирования стока и химического состава малых рек в условиях зимней межени. Научно-исследовательские работы на данном полигоне ведутся уже более тридцати лет, из которых последние двенадцать включают и гидрологические исследования [1, 2]. Проведенные зимой 2025 г. работы продолжают цикл многолетних исследований.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования явились водосборы двух малых рек – Заячьей и Соденьги. Они протекают на юге Архангельской области и относятся к бассейну р. Устья – правого притока р. Ваги, которая, в свою очередь, является левым притоком р. Северной Двины. Река Заячья является притоком второго порядка по отношению к р. Устье, поскольку впадает в ее левый приток – р. Кокшеньгу, а р. Соденьга непосредственно впадает в р. Устью. Водосборы этих рек граничат друг с другом: р. Соденьга протекает севернее относительно р. Заячьей. Обе реки текут преимущественно с востока на запад. Бассейн р. Заячьей отличается большей лесистостью по сравнению с р. Соденьгой. Основные гидрографические характеристики этих рек представлены в таблице 1. В общей сложности измерения проведены в 38 створах, из которых 14 расположены в бассейне р. Заячьей, а 24 – в бассейне р. Соденьги. На р. Заячья исследования проведены более детально, нежели в бассейне р. Соденьги.

Таблица 1 – Гидрографические характеристики рек Заячьей и Соденьги [3]

Река	Куда впадает	С какого берега	Расстояние от устья, км	Длина, км	Площадь водосбора, км ²	Притоки длиной менее 10 км	
						Кол-во	Общая длина, км
Заячья	Кокшеньга	пр	98	42	154	35	77
Соденьга	Устья	лв	82	53	391	58	143

Состав работ на реках бассейна р. Соденьги включал измерение расходов воды и отбор проб на химический анализ. В бассейне р. Заячьей, помимо этого, проведена снегомерная съемка и нивелировка поперечных профилей долин в створах измерений, а также определение продольных уклонов водной поверхности.

Измерение расхода воды для большинства створов проведено с использованием гидрометрической вертушки ИСП-1М. На некоторых створах из-за недостаточных глубин измерения скоростей течения проведены с помощью поплавков или объемного метода.

В ходе экспедиции было отобрано тридцать восемь проб воды на химический анализ. Сам анализ проводился в гидрохимической лаборатории кафедры гидрологии суши в г. Москве. В ходе лабораторных работ определялась общая минерализация воды, а также ионный состав.

Снегомерная съемка проведена для определения запасов воды в снежном покрове на водосборах рек. Во время снегомерных работ измерялись высота и плотность снежного покрова, что позволило рассчитать объем талого стока половодья 2025 г. Высота снега определялась по снегомерной рейке. Плотность снега измерялась с помощью снегомера ВС-43. Он состоит из полого цилиндра с площадью сечения 50 см² с режущими зубьями на одном конце и сантиметровой шкалой на наружной поверхности, крышки, ручки и весового устройства. Измерение производили путем вырезания снежного керна до соприкосновения с подстилающей поверхностью и последующего его взвешивания.

Поперечная нивелировка долин и измерение уклонов проведены с помощью GNSS-ровера. Это устройство для геодезической съемки, которое позволяет точно определить координаты и высоты точек на местности. В контексте гидрологических исследований GNSS-ровер используется для создания детальных карт рельефа дна и берегов рек, а также для определения координат точек, где проводятся измерения расхода воды и другие исследования. Данный метод обеспечивает высокую точность и достоверность данных.

Результаты исследований. Измеренные расходы находились в диапазоне от 0,078 л/с до 0,97 м³/с. Наибольший расход пришелся на замыкающий створ р. Соденьги, а наименьший – на ручей, вытекающий из Святого родника вблизи от Устьянской учебно-научной базы – левый приток р. Заячьей. В двух створах вода отсутствовала, а еще в трех наблюдался застой воды с отсутствием фиксируемого течения, из-за чего расход определить было невозможно.

В период зимней межени все реки находятся примерно в одинаковом состоянии, что позволяет на основании разовых измерений делать некоторые выводы, касающиеся пространственного распределения стока. Для этого для каждого измеренного расхода были рассчитаны модули стока, полученные делением расхода воды на площадь водосбора (рис. 1).

Модули стока Заячьей и Соденьги в замыкающем створе различаются незначительно – 3,6 и 3,0 л/(с·км²). Модули стока также изменяются по длине реки. Так на р. Заячьей модуль стока нарастает от 2,2 в верхнем до 2,9 в среднем и 3,6 л/(с·км²) в нижнем створе, что может свидетельствовать о последовательном увеличении числа дренируемых водоносных горизонтов, питающих реку. У р. Соденьги, имеющей большую площадь водосбора, такой закономерности не выявлено. Напротив, модуль стока в верхнем створе немного больше, чем в нижнем: 3,3 против 3,0 л/(с·км²). При этом именно в бассейне р. Соденьги (между верхним и нижним створами) больше притоков с отсутствием стока по сравнению с бассейном р. Заячьей.

Модули стока левобережных водосборов Соденьги и правобережных водосборов Заячьей больше, чем модули стока правобережных водосборов Соденьги и левобережных водосборов Заячьей, из этого можно аккуратно предположить, что вода с междуречья Заячьей

и Соденьги ручьями попадает в главные реки, а с противоположных сторон часть воды разгружается в соседние реки или в Соденьгу и Заячью ниже по течению подземным путем.

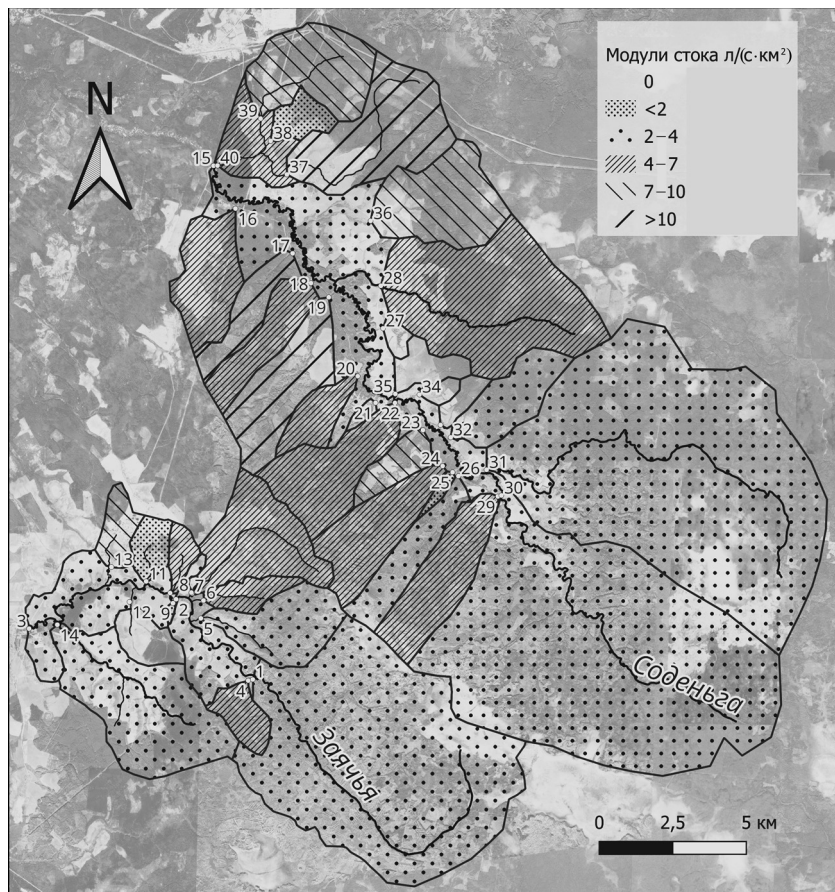


Рисунок 1 – Модули стока на водосборах Заячьей и Соденьги

Химический состав вод относится к гидрокарбонатно-кальциевой и гидрокарбонатно-магниевой группе, отличается слабой минерализацией и зависит преимущественно от геологического строения территории, литогенной основы и почв, слагающих водосборы. Ан-

тропогенный фактор формирования химического состава вод носит второстепенный характер, за одним явным исключением, о котором будет сказано ниже. Литогенной основой исследуемой территории являются мергели и глины. Водосбор реки Заячьей представлен преимущественно торфянисто-подзолисто-глееватыми почвами, водосбор реки Соденьги – дерново-подзолистыми и подзолами. По данным публичной кадастровой карты Архангельской области практически все точки отбора проб находятся на землях сельскохозяйственного назначения и лишь небольшая часть на территории лесного фонда.

Минерализация притоков р. Заячьей (рис. 2) колеблется от 91,4 до 970 мг/л. Максимальное значение зафиксировано в руч. Камешница – правом притоке р. Заячьей, что обусловлено антропогенным фактором, так как непосредственно в водоток поступают сильно минерализованные и загрязненные воды с животноводческой фермы. В самой р. Заячьей минерализация равна 361 мг/л. У притоков р. Соденьги минерализация находится в пределах от 99,9 до 478 мг/л (рис. 3). Максимальное значение наблюдалось в самой р. Соденьге. Минерализация менее 100 мг/л характерна для двух рек, водосборы которых по площади менее 3 км² и находятся на землях лесного фонда и без населенных пунктов.

Так как подстилающие породы преимущественно карбонатные, значение гидрокарбонатов во всех водотоках на порядок превышает значение остальных анионов. Максимальное значение гидрокарбонатов (640 мг/л) зафиксировано в том же руч. Камешница. Здесь также больше всего хлоридов – 64,5 мг/л, что подтверждает высокий уровень загрязнения в данном водотоке. У рек Заячьей и Соденьги значение гидрокарбонатов близки и составляют 272 и 278 мг/л соответственно.

Среднее содержание сульфатов в притоках р. Соденьги – 9,92 мг/л, а у водотоков, впадающих в р. Заячью – 4,93 мг/л. Данное различие объясняется геологическим строением и видами почв, слагающих территорию водосборов. Максимальное значение сульфатов (101 мг/л) наблюдалось в р. Соденьге. Вероятно, данное значение объясняется размерами реки, которая дренирует более глубокие горизонты, а также наличием нескольких животноводческих ферм в пределах водосбора.

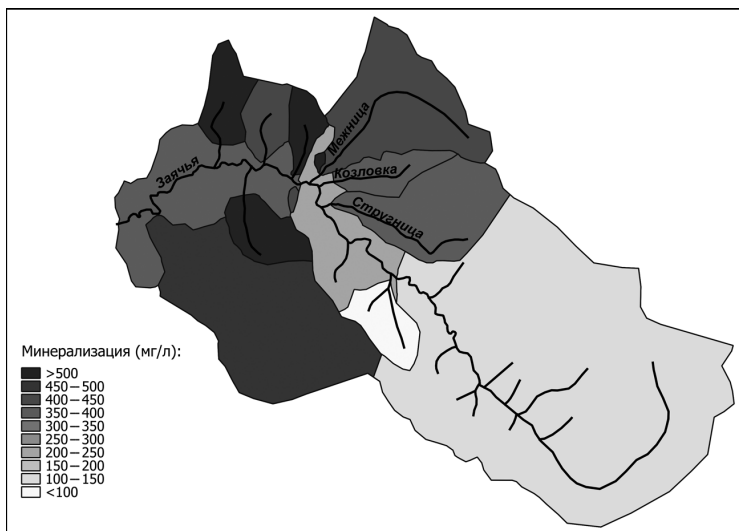


Рисунок 2 – Минерализация рек в бассейне р. Заячьей

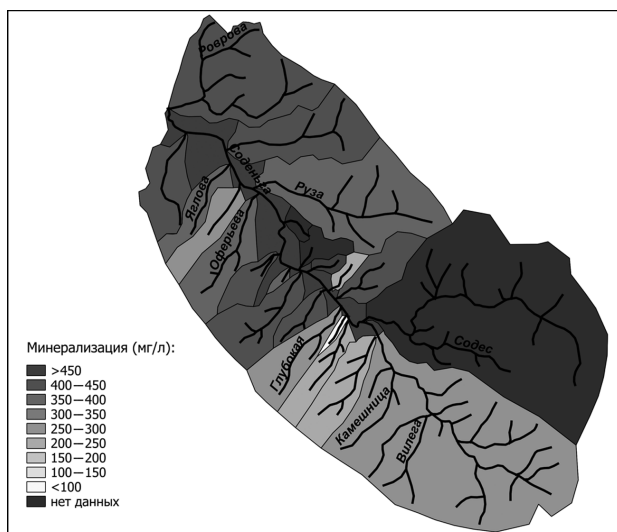


Рисунок 3 – Минерализация рек в бассейне р. Соденьги

Среднее содержание нитратов, равное 7,19 мг/л, превышает стандартное значение этого аниона в природных водах. В период зимней межени содержание нитратов больше, чем в период летней. Это связано с тем, что летом нитраты расходуются на питание фитопланктона. В грунтовых водах, питающих реку в период зимней межени, фитопланктона нет, поэтому в них нитраты могут накапливаться. Кроме того, зимой фитопланктона нет и в поверхностных водах, а органика продолжает разлагаться, что приводит к увеличению концентраций нитратов.

Преобладающие катионы – кальций и магний, так как литогенная основа представлена в виде мергелей. Содержание кальция варьирует от 13,3 до 84,8 мг/л. Значение магния в пробах находится в диапазоне от 5,07 до 41,8 мг/л. Содержание катионов натрия и калия на порядок меньше значений кальция и магния в силу геологического строения водосборов изучаемых водотоков.

Во время полевых работ проведено четыре снегомерных маршрута в пределах части водосбора р. Заячьей, ограниченной верхним и нижним створами измерений. На основе полученных данных о высоте снежного покрова и содержания воды в нем было проведено разделение изучаемого бассейна на отдельные типы ландшафтных фаций с привязкой к экспозиции склона. Наиболее распространенными типами ландшафтных фаций на данном участке были лесные массивы с различным древесным составом ($F = 18,9 \text{ км}^2$), распаханые поля на склонах речных долин ($15,7 \text{ км}^2$) и заросшие кустарником и молодым подлеском склоны речных долин ($9,8 \text{ км}^2$). Пойменные редколесья занимают $8,5 \text{ км}^2$ в пределах изучаемого водосбора, балки – $4,6 \text{ км}^2$, территории населенных пунктов – $5,9 \text{ км}^2$. Наиболее достоверно в ходе снегомерных маршрутов были изучены распаханые склоны речных долин. В то же время наблюдается недостаток информации о древостое лесов, окаймляющих исследуемый водосбор с юго-востока и северо-запада. Таким образом, деление на фации происходило по принципу деления по экспозициям. Данный подход был применен для лесных массивов, распаханых и заросших склонов. Для балок, площадь которых относительно невелика, было произведено деление на балки северного и южного направления. К поймам и населенным пунктам, территория которых не имеет четкой экспозиции, данный подход не применялся (табл. 2).

Таблица 2 – Осредненные данные по высоте снежного покрова H , содержанию воды в снежном покрове S и общей площади F для каждого типа фации

Тип фации	Экспозиция	H , м	S , мм в. э.	F , км ²
Населенный пункт	–	46,4	113	5,88
Пойма (редколесье)	–	47,8	114	8,49
Балка	Северная	50,1	140	1,96
	Южная	53,1	145	2,61
Заросший склон	Северная	52,0	119	0,65
	Северо-Восточная	44,8	82,4	2,61
	Юго-Восточная	47,7	128	1,31
	Южная	40,0	104	0,65
	Юго-Западная	50,3	98	3,26
	Северо-Западная	46,0	113	1,31
Распаханный склон (поле)	Северная	43,0	125	1,31
	Северо-Восточная	40,1	126	3,92
	Восточная	38,7	116	0,65
	Юго-Восточная	35,2	91,7	2,61
	Южная	37,8	118	0,65
	Юго-Западная	37,6	99,5	3,92
	Западная	37,9	97,0	3,26
	Северо-Западная	53,6	157	1,31
Лесной массив	Северная	46,9	109	0,65
	Северо-Восточная	39,8	112	3,26
	Юго-Восточная	48,3	115	3,92
	Южная	41,3	112	2,61
	Юго-Западная	41,9	107	3,92
	Западная	45,5	107	1,31
	Северо-Западная	48,8	118	3,26

Из таблицы 2 следует, что наибольшие значения высоты снежного покрова и содержания воды были характерны для балок, конфигурация которых позволяет накапливать не только выпавший, но и сносимый в результате метелей снег. Наименьшая глубина снежного покрова отмечалась на распаханных склонах, за исключением склонов северной экспозиции, для которых отмечались повышенные значения содержания воды (до 157 мм водного эквивалента (в. э.) на склонах северо-западной экспозиции). В целом отмечается относительно равномерное распределение снежного покрова по территории: его высота на начало февраля колебалась в пределах 40–50 см, а запас воды – в пределах 100–120 мм в. э. для всего изучаемого полигона. Средневзвешенное значение запасов воды для изучаемой части бассейна р. Заячьей равно 112,8 мм водного эквивалента. Наибольшие запасы воды характерны непосредственно для речной долины р. Заячьей (рис. 4). Наименьший запас воды в снежном покрове отмечен на частично залесенных бассейнах притоков – р. Межницы, Стругницы, Козловки и Межницы-Заячьерецкой. Наибольшие запасы воды наблюдались в верхней части изучаемой части речной долины р. Заячьей, где конфигурация рельефа и ландшафтные фации (узкая речная долина с распаханными склонами северо-восточной экспозиции и залесенными склонами северо-западной и западной экспозиции) способствуют снегонакоплению.

В заключение отдельно стоит отметить то, что на момент проведения съемок высота снежного покрова по данным метеостанции Шангалы составляла примерно 47–53 см, что вполне соотносится с данными снегомерных съемок (с учетом расстояния в 25–30 км). Таким образом, результаты вычисления запасов воды в снежном покрове для ландшафтных фаций различных экспозиций можно применить и для других участков близлежащих территорий.

Для изучения морфометрии долин помимо материалов собственных полевых измерений проведена обработка космических снимков. Были получены три космических снимка: первый – со спутника Landsat 8, при помощи сервиса Earth Explorer Геологической службы США. Он был сделан 23 июля 2024 года и имеет пространственное разрешение 30 м в спектральных каналах и 15 м в панхроматическом. Два других снимка получены с аппарата Sentinel-2 при помощи сер-

виса Copernicus Browser Европейского космического агентства. На них исследуемая территория изображена по состоянию на 24 февраля 2025 г. и 5 мая 2024 г. с пространственным разрешением 10 м.

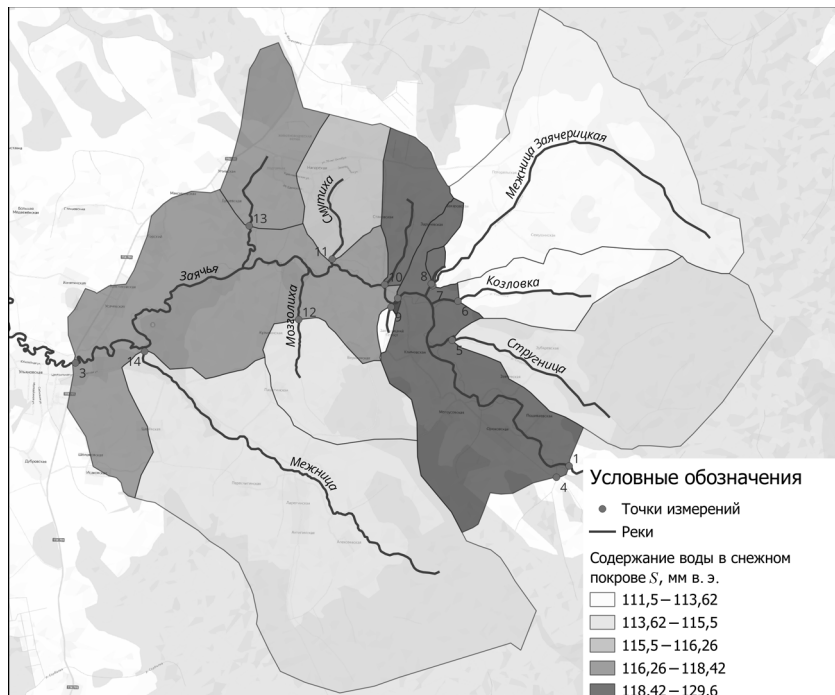


Рисунок 4 – Пространственное распределение запасов воды в снежном покрове на 1 февраля 2025 г. для изучаемой части бассейна р. Заячьей

Для анализа морфометрических особенностей территории были загружены цифровые модели рельефа (ЦМР) FABDEM и ArcticDEM, покрывающие территорию проведения исследований в районе р. Заячьей и р. Соденьги. ЦМР ArcticDEM имеет пространственное разрешение 2 м и была получена с помощью сервиса FRIDGE Полярного центра пространственных данных Миннесотского университета. ЦМР FABDEM является обработанной моделью Copernicus DEM (убраны леса, здания и другие артефакты) и имеет пространственное

разрешение 2 м. Модель была получена при помощи сайта Бристольского университета.

Для составления поперечных профилей долин в нескольких створах проводились измерения при помощи GNSS приемника: совершался обход по профилю долины, измерялись координаты точек пересечения маршрута с характерными линиями рельефа.

В ГИС-пакете ArcGIS Desktop 10.8.2 были произведены обработка и анализ полученных полевых данных, спутниковых снимков и ЦМР. Использовалась группа инструментов «Гидрология» из расширения Whitebox, с помощью которой было произведено построение водотоков и выделение их бассейнов на основе ЦМР, а также произведено моделирование подъема уровня воды на исследуемых водотоках с целью рассчитать площадь затопляемых в ходе половодья земель. На основе данных геодезических работ построены поперечные профили долин исследуемых водотоков, на которые была нанесена информация о затопляемых участках, полученная в ходе моделирования половодья.

Была оценена неоднородность поперечных профилей на основных притоках реки Заячьей. Для главной реки характерна ящикообразная долина, с субгоризонтальным днищем и крутыми залесенными склонами, образующие ступени высокой поймы и надпойменных террас. Поперечные профили на участках сельскохозяйственных земель разложистые, с небольшими уклонами прилежащих склонов. В залесенной части водосбора притоки имеют трапцевидный поперечный профиль, с неглубоким днищем, где во вторичном эрозионном врезе располагается исследуемый водоток. Сведения о неоднородности поперечного профиля являются важной компонентой для оценки площадей затопления приречных территорий при разном уровне воды в водотоке.

По данным ЦМР была оценена расчлененность рельефа водосборов исследуемых рек. Наибольшим значением неоднородности рельефа обладают левые притоки р. Соденьги. При этом меженный зимний сток в них минимален. Это косвенно подтверждает информацию о том, что наблюдается перехват стока подземным водосбором.

Результаты данного вида работ интересны скорее в контексте многолетних измерений, проводимых на реках данного полигона, и

малоинформативны в рамках разовых измерений, проведенных зимой этого года.

Выводы. Полученные по измеренным расходам воды зимние модули стока увеличиваются по длине р. Заячьей, что может свидетельствовать о последовательном увеличении числа дренируемых водоносных горизонтов. Для р. Соденьги, площадь водосбора которой в 2,5 раза больше по сравнению с р. Заячьей, такой закономерности не наблюдается. Во всех исследуемых реках вода имеет малую или среднюю минерализацию. Исключение составил руч. Камешница с заметно повышенной минерализацией вследствие стоков с животноводческой фермы. В целом, вода имеет гидрокарбонатно-кальциевый состав, и ее минерализация увеличивается по длине рек. Соотношение между главными ионами слабо меняется для разных рек. По запасам воды в снежном покрове в бассейне р. Заячьей лидирует долина главной реки. Наименьшие снегозапасы характерны для приводораздельной части водосбора. Результаты данного вида работ интересны во многом в контексте многолетних измерений, проводимых на реках данного полигона, и выполненные работы в рамках зимней экспедиции являются их неотъемлемой частью.

Список литературы

1. Хорошев А.В., Косицкий А.Г., Лукьянова А.Н. Гидрологические и гидрохимические основания проектирования экологического каркаса агроландшафта юга Архангельской области // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 4. С. 63–72.
2. Хорошев А. В., Лукьянова А.Н., Косицкий А. Г., Школьный Д.И. Зависимость изменчивости гидрологических и гидрохимических свойств стока от ландшафтной структуры бассейна в таежной зоне // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151. № 1. С. 45–60.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 612 с.