

На правах рукописи



Ясинский Николай Сергеевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ФОСФОРА В
ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ БАСЕЙНА РЕКИ МОСКВЫ**

25.00.27 — Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева

Научный руководитель: Белолобцев Александр Иванович, д.с.-х.н.,
профессор, заведующий кафедрой
Метеорологии и климатологии РГАУ МСХА
им. К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты: Кондратьев Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н,
заместитель директора ФГБУ Науки Институт
озероведения РАН

Чалов Сергей Романович, к.г.н., заместитель
декана по международным связям,
Географический факультет МГУ им. М.В.
Ломоносова

Ведущая организация: Институт водных проблем РАН

Защита состоится « » 20 г. в 11.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.046.04 на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт географии Российской академии
наук» по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии
РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте
Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан « » 2019 г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажных носителях в двух
экземплярах, заверенные подписью и печатью) просим направлять по адресу
119017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29, ученому секретарю
Диссертационного совета Д 002.046.04, Зайцевой И.С.
Факс 8 (495) 959-00-33, e-mail: d00204604@igras.ru; zaitseva@igras.ru

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

И.С. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Биогенные элементы, содержащиеся во вносимых удобрениях, используются растениями не полностью и частично выносятся с речным стоком. Кроме того, в сельскохозяйственном производстве присутствуют иные источники биогенных элементов, включающие разложение растительных остатков на полях или побочные продукты животноводства. В совокупности эти источники вносят значительный вклад в формирование антропогенной биогенной нагрузки и, как следствие, в процесс эвтрофирования, приводящего к деградации экосистем озер и водохранилищ. Оптимальное регулирование биогенной нагрузки может быть достигнуто при условии нашего полного знания о системе формирования биогенного стока, начиная с его источников и заканчивая трансформацией в водном объекте.

Формирование речного стока биогенных элементов является комплексным процессом, в котором участвуют все компоненты природной среды от приземной атмосферы до глубоких горизонтов подземных вод. Межгодовая изменчивость агроклиматических характеристик оказывает влияние не только на водный сток, но и на факторы, напрямую влияющие на поведение биогенных элементов в почве и водных объектах. Физико-математические модели качества воды в совокупности с полевыми и экспериментальными данными позволяют исследовать процесс формирования биогенного стока и отдельных его компонентов, задаваясь разными условиями на водосборе и варьируя количественные показатели его источников. Для процесса эвтрофирования из биогенных элементов лимитирующим является фосфор, выявление закономерностей стока которого служит важным шагом к снижению антропогенного воздействия на водные экосистемы.

Степень разработанности темы исследования. Начало интенсивного изучения роли питательных веществ в жизни растений и принципов внесения удобрений следует отнести к периодам деятельности К.А. Тимирязева, Д.Н. Прянишникова, П.С. Коссовича. Фосфорным удобрениям посвятил значительную часть своих работ выдающийся агрохимик А.В. Соколов.

Исследования биогенного стока в нашей стране, начиная со второй половины XX века, проводились учеными МГУ, ГГИ и других организаций в связи с изучением процессов эвтрофирования водохранилищ. Здесь необходимо назвать имена К.К. Эдельштейна, М.Б. Заславской, Ю.С. Даденко, которые до настоящего времени продолжают проводить исследования на водосборе Можайского, Истринского и других водохранилищ Европейской части России.

За рубежом работы по созданию моделей биогенного стока начались в 1980-х годах в связи с выходом законодательных актов, предписывающих его регулирование («Закон о чистой воде») и, начиная с моделей масштаба поля (EPIC) или первых комплексных моделей CREAMS, HSPF, постепенно пришли к созданию моделирующих комплексов SWAT, SWIM и HYPE. В России важный шаг к концептуальному моделированию биогенного стока для оценки нагрузки на водные объекты был сделан С.А. Кондратьевым и С.В. Ясинским. Работа по созданию модели качества на основе ECOMAG ведется в ИВП РАН Ю.Г. Мотовиловым. Тем не менее, комплексных моделей качества воды в России нет.

Цель и задачи исследования. Цель работы – выявление закономерностей стока фосфора с речного водосбора на основе комплексной гидролого-гидрохимической модели.

Для реализации указанной цели были решены следующие **задачи**:

1. провести комплекс полевых исследований физических и химических свойств почв верхней части бассейна р. Москвы и их пространственного распределения;
2. проанализировать типы землепользования на водосборе р. Москва на основе карт, данных дистанционного зондирования и натурных данных с построением карт сельскохозяйственного использования водосбора;
3. оценить влияние агроклиматических характеристик верхней части бассейна р. Москвы на сток фосфора;

4. разработать алгоритмы предмодельного анализа и обработки почвенно-экологических и гидрометеорологических данных;
5. разработать методику расчета речного стока фосфора на основе гидрологической модели HYPE;
6. провести серию модельных расчетов для адаптации модели HYPE в верхней части бассейна р. Москвы.

В качестве **объекта исследования** был выбран водосбор верхней р. Москвы выше Можайского водохранилища. Выбор данного объекта определён географическими условиями водосбора и достаточно высокой степенью его сельскохозяйственной освоенности. **Предметом исследования** являются закономерности формирования речного стока фосфора на малом водосборе.

Научная новизна работы.

- впервые для территории России применена модель речного и биогенного стока HYPE на малом водосборе с описанием условий землепользования;
- разработана методика расчета стока фосфора на малом водосборе с высокой степенью сельскохозяйственного освоения
- создана автоматизированная система подготовки пространственной информации и рядов гидрометеорологических характеристик для генерации входных файлов модели на базе открытого программного обеспечения GRASS и QGIS, а также средствами языка программирования Python.
- получены количественные оценки влияния межгодовых изменений агроклиматических характеристик и водного режима на процессы формирования стока фосфора в верхней части бассейна р. Москвы.

Практическая значимость исследования. Направление расчетов и прогнозов стока биогенных элементов в настоящее время активно развивается как в России, так и за рубежом. Значимость исследований формирования биогенного стока в нашей стране подтверждает запуск подпрограммы Министерства природных ресурсов и экологии «Регулирование качества окружающей среды» Федеральной программы «Охрана окружающей среды» на

2012 – 2020 гг., предполагающий снижение диффузного стока загрязняющих веществ и разработку новых методов его оценки. Разработка новых методик расчета биогенного стока позволит создавать моделирующие комплексы, дающие возможность поиска оптимальных способов сельскохозяйственного использования территорий, минимизирующих негативное воздействие на водные экосистемы, и прогнозирования изменений биогенного стока в условиях антропогенного воздействия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета стока фосфора и его генетических составляющих на основе комплексной гидролого-гидрохимической модели для малого водосбора со значительной степенью сельскохозяйственного освоения.
2. Оценка влияния межгодовых изменений агроклиматических характеристик, режима внесения минеральных удобрений и перестройки структуры землепользования водосбора на сток фосфора, интенсивность и направленность процессов деградации почв сельскохозяйственного назначения и распределение биогенных веществ в почвенном профиле.
3. Оценка влияния водного режима на вынос фосфора с территории водосбора и его генетические составляющие.

Достоверность результатов исследования. Работа основана на достоверных многолетних гидрологических, гидрохимических и метеорологических наблюдениях. Полевые данные были получены в соответствии с официальными рекомендуемыми методиками. Результаты моделирования водного стока и стока фосфора, полученные в ходе работы, верифицированы на независимом материале и их соответствие наблюдаемым данным оценено как удовлетворительное полностью или по ряду критериев.

Апробация результатов исследования. Отдельные результаты работы в ходе написания диссертации докладывались, обсуждались и опубликованы в трудах следующих международных конференций и форумов: Всероссийская научно-практическая конференция (Пермь, 2005); Международная научно-практическая конференция, посвященной 200-летию Н.И. Железнова (Москва,

2016 г.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 100-летию И. С. Шатилова, (Москва, 2017); II Международная конференция РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ: ТРАДИЦИИ И ИННОВАЦИИ (Москва, 2017); V Международный Водный Форум «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И КЛИМАТ» (Минск, 2017); Генеральная Ассамблея Европейского союза геонаук (EGU) (Австрия, Вена, 2018); Международная конференция InterMET/InterFLOOD Asia (Сингапур, 2019).

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертации имеется 10 публикаций, в том числе 2 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и 1 в издании, входящем в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Личный вклад автора. Автором получены данные о содержании фосфора в р. Москва и р. Лусьянка в 2008 – 2010 гг., проведены исследования почв и ландшафтов водосбора р. Москва в 2017 г., собран и обобщен материал по моделированию стока биогенных элементов в мировой и российской научной практике, на основании чего разработана принципиальная схема фосфорного блока модели качества воды. Уточнена карта землепользования Можайского водохранилища, составленная в МГУ. Разработана методика расчета стока фосфора на основе модели HYPE на малом водосборе с высокой степенью сельскохозяйственного освоения. Разработаны и реализованы в виде программ алгоритмы предмодельной подготовки данных для HYPE и расчета агрометеорологических характеристик водосбора в среде GRASS GIS и на языке Python.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 174 страницы. Основной текст изложен на 147 страницах, содержит 13 таблиц и 37 рисунков. Список литературы включает 181 наименование, в том числе 78 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает благодарность коллективам кафедр Метеорологии и климатологии РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, кафедры Гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова и лично Даценко Ю.С., Заславской М.Б. за многолетнюю помощь в исследованиях, Мотовилову Ю.Г. за консультации по вопросам моделирования речного стока, Соколову Д.И. и Ериной О.Н. за предоставленные материалы лабораторных исследований, а также коллективу и руководству ООО «НПЦ «МэпМейкер» за всестороннюю поддержку в период подготовки диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится актуальность работы, степень её разработанности, описаны цель и задачи исследования, его научная новизна и практическая значимость, методология исследования, описаны положения, выносимые на защиту, степень достоверности диссертации и апробация результатов.

В первом разделе **первой главы** содержится концепция работы и описано современное состояние знаний о круговороте биогенных элементов, современных климатических изменениях, изменениях водного стока и обсуждаются принципы и подходы к моделированию биогенного стока.

Во втором разделе приведён обзор закономерностей и процессов, участвующих в круговоротах фосфора и азота, охватывающий результаты различных исследований, как российских, так и зарубежных.

В третьем разделе приведено сопоставление различных моделей биогенного стока, обсуждаются особенности моделирования процессов круговорота фосфора в разных моделях. Особое внимание уделено моделям SWAT, SWIM и ECOMAG. Дается общая схема фосфорного блока для модели качества воды, предложенная автором на основе анализа ряда моделей. Обсуждаются современные проблемы в области моделирования качества воды и достижения в этой области российских ученых.

В первом разделе **второй главы** дан обзор методов полевых и камеральных исследований, необходимых для параметризации, калибровки и верификации моделей биогенного стока, а также перечень информационных источников, использованных в исследовании: ряды температуры и осадков за периоды с 1966 по 2018 гг. по метеостанциям Можайск, Гагарин, Волоколамск, Старица, Клин, Малоярославец; расходы, уровни и другая гидрологическая информация по гидрологическому посту р. Москва, дер. Барсуки за период с 1966 по 2015 гг.; данные о почвах, их физических и химических характеристиках из опубликованных источников и по результатам полевых исследований водосбора в 2017 г.; данные лабораторных исследований содержания биогенных элементов в почвах в 2017 г.; данные о содержании биогенных элементов в воде р. Москва, а также другие экспедиционные данные и данные наблюдений, полученные автором и другими исследователями в разные годы в период с 1980 по 2017 гг.; карта угодий Можайского полигона, составленная в МГУ им. Ломоносова и откорректированная по данным дистанционного зондирования Земли; цифровые модели рельефа разрешением 1 минута (30 м), полученные по данным SRTM; статистические сведения о сельскохозяйственном производстве, полученные от частных агрохолдингов, использующих земельные угодья на территории водосбора и из открытых источников.

Методологической основой работы являются: Традиционные химико-аналитические методы лабораторного исследования, методы полевых и экспериментальных исследований, принятые в гидрологии, почвоведении, ландшафтоведении и метеорологии, методы математического моделирования, методы пространственного геоинформационного анализа и авторские методики и алгоритмы обработки данных, реализованные в виде компьютерных программ.

Второй раздел второй главы характеризует объект исследования, водосбор р. Москва, в аспектах общегеографических условий, межгодовых климатических изменений и сельскохозяйственной освоенности. Приведены

результаты расчетов агроклиматических характеристик и водности за период 2000 – 2018 гг. для территории водосбора, используемые в работе для экспериментов с моделью.

Точки обследования почв на водосборе включали закладку разрезов и прикопок в предварительно заданных точках (см. рис. 1). Количество и расположение точек обследования отвечало необходимости охвата всего многообразия почв, ландшафтов и типов землепользования водосбора в условиях возможностей экспедиционной группы. Точки были расположены группами, в каждой из которых участки с различными типами землепользования находились на наименьшем удалении друг от друга, но так, чтобы каждая точка в совокупности характеризовала иной тип почв, землепользования и высотное положение на водосборе. Аналогично располагались и разрезы друг относительно друга. Всего было заложено 5 разрезов и 20 прикопок.

Работы по отбору проб воды производились в соответствии с руководящими документами ГОСТ Р 51592-2000 и ГОСТ Р 51593-2000. В лаборатории в высушенных и измельченных пробах определялось содержание валового фосфора по МВИ №2420/69-2004, подвижного фосфора по ГОСТ Р 54650-2011 и органического вещества по ГОСТ 26213-91. Определение содержания фосфора в воде регламентировалось соответственно документами РД 52.10.243-92, РД 52.10.739-2010 (общий фосфор). В пробах воды определялось содержание растворенных и взвешенных форм органического и неорганического фосфора. Анализ производился методом колориметрии на аппарате ФЭК-56М.

Временные ряды температуры и осадков метеостанций Гагарин, Можайск, Старица, Волоколамск, Клин и Малоярославец были проинтерполированы в точки центроидов субводосборов методом кригинга с вариограммами. Для этой цели была написана программа обработки данных метеостанций из табличного формата на языке Python. Программа включает автозагрузку файлов, проверку ошибок в данных, заполнение пропусков и

интерполяцию с созданием временных рядов заданной продолжительности. Попарная скоррелированность данных метеостанций, использованных при расчете агрометеорологических характеристик по месячным суммам осадков была не менее 0.75, по средним декадным температурам – не менее 0,98.

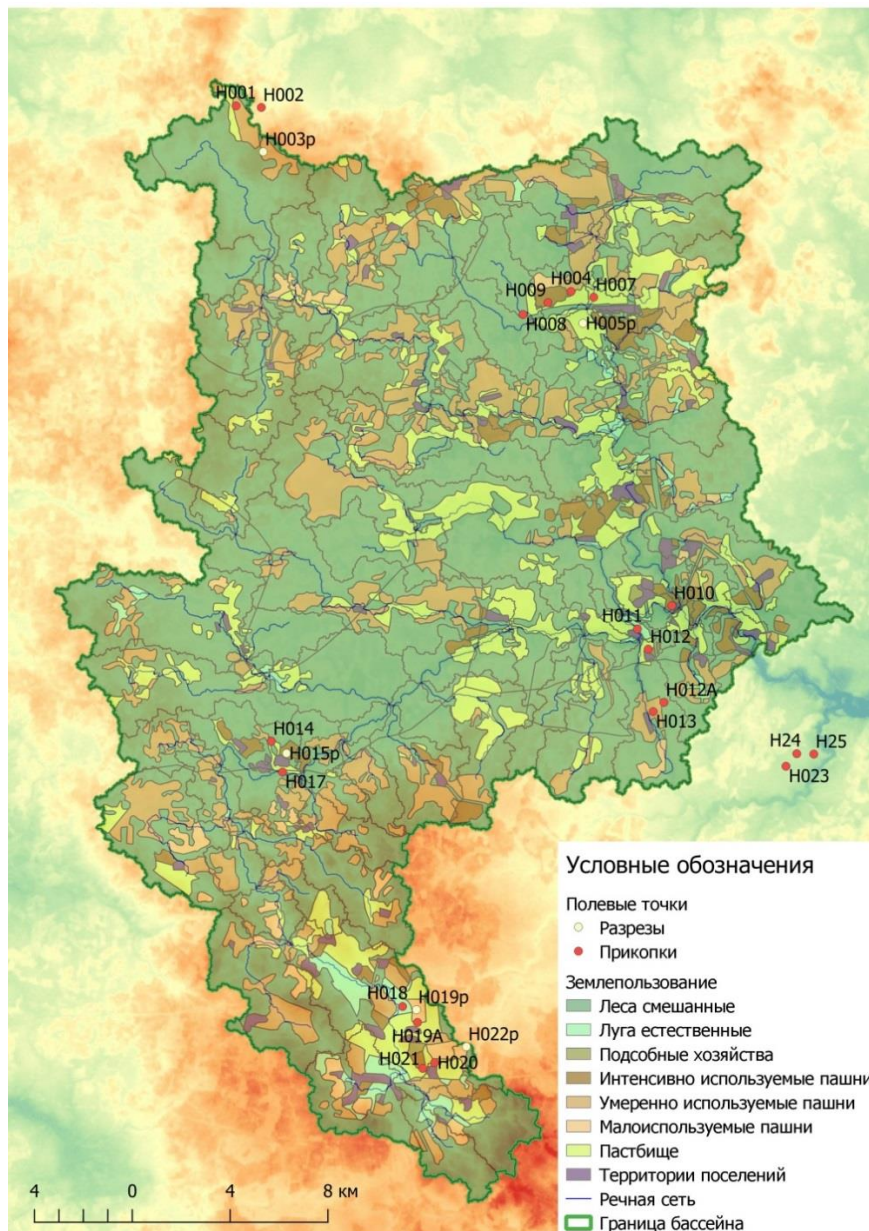


Рисунок 1. Карта землепользования верхней части водосбора р. Москва в створе дер. Барсуки с нанесением точек полевых исследований, проведенных в 2017 г.

Объект исследования, водосбор верхней р. Москвы расположен в центральной части Смоленско-Московской возвышенности и относится к провинции ледниковых холмистых и плоских равнин. Высота водосбора

изменяется от 160 до 311 м абс. Ширина реки Москвы в пределах исследуемого водосбора составляет 2 – 15 м. На правом берегу преобладают смешанные леса, а севернее деревни Холмово распространены болота. На левом берегу произрастает хвойный лес – еловый и елово-сосновый. Почвообразующие породы представлены на водоразделе с Окой известняками и доломитами, на территории водосбора – преимущественно песками и глинами с прослоями известняка. Суглинок без включений относится к днепровско-московской и московской области водно-ледниковых отложений. На территории водосбора распространены карстующиеся породы.

Климат бассейна верхней р. Москвы умеренно-континентальный с холодной зимой и умеренно-теплым летом. Средняя годовая температура воздуха над территорией составляет 5.3 градуса со средней температурой июля 18.8 градусов, января –8.1 градуса. Холодный период продолжается пять месяцев с ноября по март. Минимальная температура достигала в этот период - 43.1 градуса, максимальная температура 38.2. Устойчивый переход температуры воздуха через 0 отмечается в среднем 22 марта, через 10 градусов – 1 мая. Средняя многолетняя сумма осадков составляет 705 мм. Снежный покров образуется 28 октября, максимума его высота достигает в конце февраля со средними значениями 19.6, максимальными – до 78 см (Научно-прикладной справочник «Климат России»).

С точки зрения агроклиматического районирования территория расположена в умеренно влажной зоне с суммой активных температур 1800 – 2000 градусов. Повышенное увлажнение приурочено к возвышенным участкам, умеренное – к понижениям. Территория наиболее благоприятна для выращивания картофеля, овощных культур, гречихи, ранних яровых культур. В настоящее время на территории водосбора действует ряд предприятий агропромышленного комплекса такие как ЗАО «Синичино», ЗАО «Уваровский» колхоз», ЗАО «Поречье» и другие, занимающиеся как растениеводством, так и животноводством. Также на территории водосбора

имеется несколько фермерских и крестьянских хозяйств, занимающихся растениеводством, животноводством, птицеводством.

Третья глава дает описание и анализ полевых исследований, проводившихся автором и другими исследователями в период с 1980 по 2017 гг. В период с 1980 по 2017 на территории водосбора Можайского водохранилища были проведены исследования водного стока биогенных элементов в ходе эксперимента «воднобалансовый 1984 год», исследования концентраций фосфора в период половодья в 2009 – 2010 году в створе р. Москва, дер. Барсуки и р. Лусьянка, дер. Черники, исследования стока фосфора, взвешенных веществ и комплекса показателей качества воды в 2012 г. на водохранилище и его притоках. Исследования почв водосбора проводились в 2017 г. и включали их характеристику, а также исследования физических и химических свойств.

Таблица 1. Содержание биогенных элементов в почвогрунтах водосбора на разных типах угодий в 2017 г.

Угодья	Фосфор валовый, г/кг		Фосфор подвижный, мг/кг		Органическое в-во, г/кг		Валовый азот, г/кг (пересчет)*	
	АУ/Р**	BEL	АУ/Р	BEL	АУ/Р	BEL	АУ/Р	BEL
Пашня	1980-е (согласно карте землепользования)							
Слабая	1,34	1,18	41,33	43,77	16,40	11,30	0,82	0,57
Средняя	1,58	0,99	42,80	26,04	14,22	10,26	0,71	0,51
Интенс.	2,30	1,38	57,00	32,58	12,84	9,42	0,64	0,47
Пастбище	1,81	1,49	57,74	41,92	15,84	11,64	0,79	0,58
	2017 (по результатам полевого обследования)							
Неиспользуемые	1,98	1,37	67,19	39,74	16,68	11,12	0,83	0,56
Используемые	1,74	1,12	35,44	26,63	12,34	9,49	0,62	0,47
	Без изменений							
Луг	3,44	2,27	54,70	63,40	18,60	12,45	0,93	0,62
Лес	1,19	1,08	23,87	23,90	17,40	9,50	0,87	0,48

*Пересчет из органического вещества с коэффициентом 1/20

почвенные горизонты приведены в соответствие с Новой классификацией почв России:

АУ – серогумусовый (дерновый), Р – агрогумусовый, BEL – субэлювиальный

Проведенные в 1984, 2010 и 2012 гг. полевые исследования биогенного стока показывают снижение пиковых концентраций фосфора при сохранении

меженных. Взвешенная форма фосфора в половодье и паводки в 2 – 3 раза превышает концентрацию растворенной.

При исследовании ландшафтов водосбора было обнаружено троекратное уменьшение количества используемых сельскохозяйственных угодий. Химический анализ почв демонстрирует повышенное содержание валовых форм фосфора на 15 – 20% и подвижных форм на 50 – 70% на неиспользуемых угодьях. В разрезах выявлены равные содержания и даже инверсии содержания биогенных элементов в почвенном профиле. В таблице 1 представлены результаты лабораторного анализа содержания биогенных элементов в почвах водосбора по результатам исследований в 2017 г.

По результатам исследований 1987 г. (М.С. Симакова и др., 1999) на неоглеенных почвах различной степени и давности осушения наблюдалось содержание общего азота порядка 1 г/кг в горизонте РУ и 0.3 – 0.4 г/кг в горизонте ВТ (глубина отбора пробы 40 - 50 см). Подвижный фосфор анализировался в тех же пробах на уровне от 66 до 970 мг/кг в горизонте РУ и 20 – 30 мг/кг в горизонте ВТ. Согласно нашим исследованиям, содержание общего азота в верхнем горизонте почвы варьировало от 1.15 до 0.4 г/кг. Содержание подвижного фосфора в верхнем горизонте составило в двух пробах 100 – 160 мг/кг, в остальных пробах изменялось от 20 до 75 мг/кг. В горизонтах ELBT и ВТ содержание подвижного фосфора находится на уровне 20 – 30 мг/кг и в трех пробах составляет от 50 до 90 мг/кг. Во всех наших пробах на глубине 1 метр содержание подвижного фосфора в 1.5 – 2 раза выше, чем на глубине 70 см.

В ходе анализа агроклиматических характеристик выявлен рост среднемесячных температур воздуха на 3 – 5 градусов, увеличение амплитуды и периода колебаний зимних сумм осадков. Рост продолжительности вегетационного и укорачивания холодного периодов сопровождается смещением дат их наступления соответственно на более ранние (9 дней) и более поздние (30 дней) сроки. Эти процессы вызывают увеличение зимнего стока при оттепелях, усиление промывного режима почв, что приводит к

миграции биогенных элементов вниз по профилю. Для культивируемых на водосборе растений изменение характеристик периода вегетации может означать усиление потребления биогенных элементов из почвы весной и увеличение их выноса поздним летом и осенью.

В **четвертой главе** представлено описание структуры модели HYPE и результаты моделирования. Приведены результаты расчетов стока фосфора для лет разной водности и экспериментов с моделью. Дана оценка фосфорной нагрузки на речную сеть в годы различной водности и генетических составляющих биогенного стока.

Применяемая для расчетов в данной работе модель HYPE (HYdrologic Predictions in the Environment) – динамическая, физически обоснованная модель с частично распределёнными параметрами, непрерывная по времени, работающая в масштабе водосбора. Данная модель развивается с 2005 года в SMHI (Шведский Гидрометеорологический Институт) и уже несколько лет активно используется в этой организации для прогнозов речного стока. На территории Швеции модель применена для 17313 бассейнов. Для территории Европы запуск модели производился на данных с меньшим разрешением и служил для оценки стока в бассейны морей. Для территории нашей страны модель также применялась в исследованиях бассейна Лены (Gelfan et al., 2017). Из преимуществ модели следует отметить открытость кода, простой формат входных файлов, гибкость настройки, наличие ряда альтернативных встроенных моделей для основных составляющих водного, химического баланса и процессов транспорта воды и химических веществ.

Модель не использует численных методов решения, все зависимости решаются аналитически. Для процессов испарения влаги в комплексе предусмотрено пять различных моделей. В использованной нами модели оно рассчитывается, когда температура находится выше порогового значения t_{tmp} в пределах двух верхних горизонтов почвы. После расчета базового потенциального испарения, которое зависит от пространственного параметра скорости испарения $sevr$, оно распределяется между двумя верхними

горизонтами экспоненциально, в зависимости от глубин горизонтов. Конечное испарение зависит от доступности почвенной влаги: оно равно нулю, если содержание влаги меньше влажности завядания, равно испаряемости, если содержание влаги за вычетом влажности завядания больше наименьшей полевой влагоемкости и линейно возрастает с коэффициентом $(B - B_3)/НПВ$, где B – влажность почвы, B_3 – влажность завядания, $НПВ$ – наименьшая полевая влагоемкость. Затем испарение рассчитывается как максимум между испарением и доступной влагой $(B - B_3)$.

Процессы формирования как водного, так и химического стока до поступления в речную сеть задаются балансовыми уравнениями. Сток в речной сети задан расчетом времени добегания с последующим расчетом трансформации паводочной волны, задаваемой решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = q(t) - Q(t) \\ Q(t) = \frac{W}{k} \end{cases} \quad (1)$$

где W – объем воды в русле, q – боковой приток, Q – расход воды на выходе участка, k – коэффициент, имеющий размерность времени и обусловленный временем добегания.

Взаимоотношение между ёмкостями почвенных форм фосфора представлено на рис. 2. Адсорбция биогенных веществ на почвенных частицах (ABS) задается с помощью изотермы Фрейндлиха по формуле:

$$ABS = (KP_s^N - P_0)(1 - e^{-r}) \quad (2)$$

где K – коэффициент Фрейндлиха, N – показатель степени изотермы Фрейндлиха, r – параметр скорости реакции, P_0 – начальная концентрация.

Эрозия почвы и вынос взвешенного фосфора (РР) задается комплексом уравнений, объединяющих дождевую эрозию (ДЭ) и плоскостную эрозию (ПЭ):

$$ДЭ = E(1 - Кл)Эроз \quad (3)$$

$$ПЭ = \frac{(ПСток * 365)^{сxp}(1 - Рс) \frac{1}{0.5C_{ц}} \sin \frac{У_{клон}}{100}}{365} \quad (4)$$

$$PP = k(ДЭ + ПЭ)Tr \cdot \frac{partP + slowP}{\rho\varepsilon} Об \quad (5)$$

Здесь E – энергия дождя, вычисляемая по эмпирической формуле в зависимости от количества осадков, $Kл$ покрытие поверхности выращиваемыми культурами, $Pс$ покрытие их опадом и остатками стерни после жатвы, $Эроз$ – коэффициент эрозивности почвы, $ПСток$ – рассчитываемый моделью локальный поверхностный сток, sxp – калибруемый параметр, $Сц$ – коэффициент сил сцепления, имеющийся в литературе, $Уклон$ – средневзвешенный уклон субводосбора, $k = 0.000001$, Tr – фактор транспортирующей способности воды, $\rho\varepsilon$ – плотность и порозность почвы, $partP$ и $slowP$ содержание фосфора в соответствующих пулах (см. рис. 2), $Об$ – коэффициент обогащения, задаваемый графиком обогащения, зависящего от времени и критических уровней транспортирующей способности.

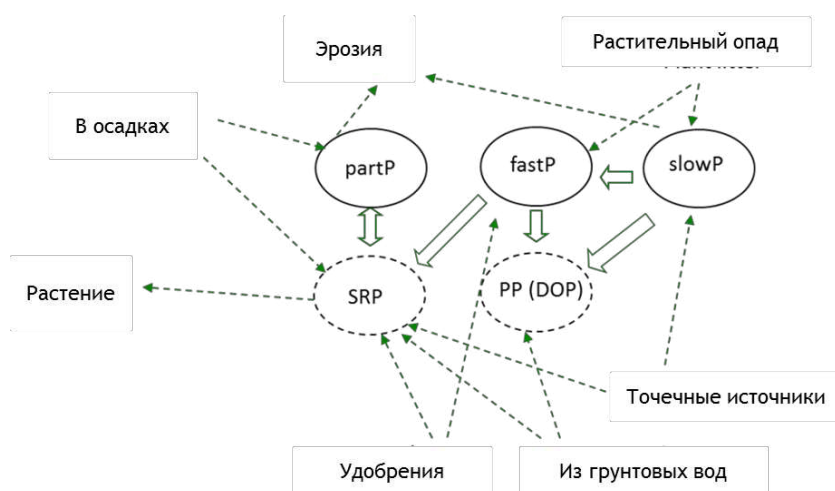


Рисунок 2. Схема взаимоотношений емкостей различных форм фосфора и их источников в модели.

partP – фосфор адсорбированный на почвенных частицах, **fastP** – фосфор переходящий в растворенный органический (быстрая реакция), **slowP** – фосфор гумуса (медленная реакция), **DOP** – фосфор в растворенной органической форме, **SRP** – фосфор в растворенной неорганической форме.

Запуск модели осуществлялся для периодов с 1999 по 2017 и с 1966 по 1987 гг. Эти периоды были разбиты на период калибровки водной части модели с 2002 по 2012 гг., период валидации водной части с 2013 по 2015 гг., период валидации с 1968 по 1980 гг. и 1983 по 1987. Вывод результатов

осуществлялся с 2002 и 1968 года для того чтобы модель приобрела устойчивость. Всего было проведено порядка 200 запусков модели в ручном режиме и около 1500 запусков в рамках автоматической калибровки, что в совокупности составило 56.6 машино-часов.

Модель показала хорошие результаты при моделировании водного стока (см. рис. 3) на всех периодах, что подтверждается оценками качества результатов, представленными в таблице 2. Коэффициент корреляции Пирсона везде превышает критическое значение 0.5, критерии Клинг-Гупта и Нэша-Саттклифа также превышают критическое значение 0.5. Средняя абсолютная ошибка не превышает половины стандартного отклонения ряда наблюдаемых значений от среднего.

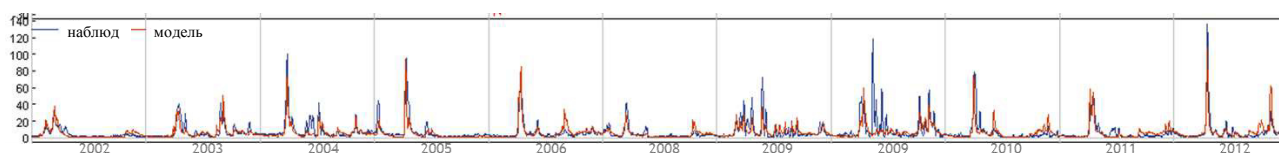


Рисунок 3. Сопоставление результатов моделирования расходов воды в замыкающем створе р. Москва, дер. Барсуки для периода калибровки 2002 - 2013 г.

Для оценки качества расчетов биогенного блока модели используются другие показатели, так как временной ряд концентраций имеет иную статистическую природу, а наблюдаемые величины для сопоставления отличаются большей дискретностью (см. табл. 3).

Таблица 2. Критерии оценки качества моделирования расходов воды для различных периодов расчета.

	r	KGE	NSE	PBIAS%	$SD_{obs}/2^*$	MAE
Приемлемое значение	> 0.5	0 - 1*	> 0.5	$-10 < PBIAS < 10$		$SD_{obs}/2$
2002 - 2012	0.77	0.68	0.6	-9.3	5.51	3.42
2013 - 2015	0.93	0.75	0.85	-10.4	5.91	2.35
1968 - 1980	0.83	0.64	0.67	8	6.37	3.43
1983 - 1987	0.65	0.52	0.41	11.5	6.12	3.19

Примечание: r – коэффициент корреляции, KGE – критерий Клинга-Гупта, NSE – критерий Нэша-Сатклиффа, PBIAS – процентное смещение, MAE – средняя абсолютная ошибка.

Сопоставление гидрографов концентраций различных форм фосфора (см. рис. 4) показывает совпадение пиков по времени и повторение хода концентраций модельными с некоторым завышением значений в паводочные периоды.

Завышение концентраций в паводочные периоды и занижение пиковых значений в половодье по большей части может быть объяснено аналогичными расхождениями при моделировании водного стока, так как форма гидрографов концентраций очень чувствительна к изменениям гидрографа стока.

Таблица 3. Критерии оценки качества моделирования ежедневных концентраций фосфора для различных лет (RMSE – среднеквадратическая ошибка, TEIL – критерий Тейла).

	RMSE		MAE		r		TEIL		SDobs/2	
	РФ	ВФ	РФ	ВФ	РФ	ВФ	РФ	ВФ	РФ	ВФ
2010	57.3	76.4	41.6	61.2	0.28	0.22	0.33	0.23	29,1	28,6
2012	67.5	82.5	42.5	51.7	0.56	0.73	0.28	0.39	23,5	15,3
1984	82.2	98.7	43.5	56.8	0.50	0.30	0.43	0.37	39,3	26,2
1984*	85.3	105.2	47.4	63.0	0.50	0.31	0.42	0.38	39,3	26,2

* расчет с увеличением количества угодий на которых вносятся удобрения

Сток взвешенного фосфора определяется стоком взвешенных веществ, поэтому при калибровке модели были приняты значения параметров, при которых сток взвешенных наносов принимает значения, сопоставимые с измерявшимися на данном посту при соответствующих расходах воды в период 2016- 2017 гг. (суточный сток взвешенных наносов достигал 500 – 600 тонн). Величина критерия RMSE в ряде случаев больше, так как он характеризует в большей степени отклонения выдающихся значений, а в 1984 году наблюдались высокие значения водного и биогенного стока.

Оценки качества моделирования ежедневных данных являются дополнительным материалом оценки, в силу отсутствия регулярных ежедневных наблюдений за концентрациями биогенных элементов и сложности их моделирования. Определение точности моделирования для

биоогенных элементов целесообразнее производить на основе сезонных оценок, что было нами сделано для стока фосфора. Кроме того при оценке качества моделирования биоогенных элементов необходимо учитывать ошибку лабораторного определения их концентраций, которая может изменяться в значительных пределах.

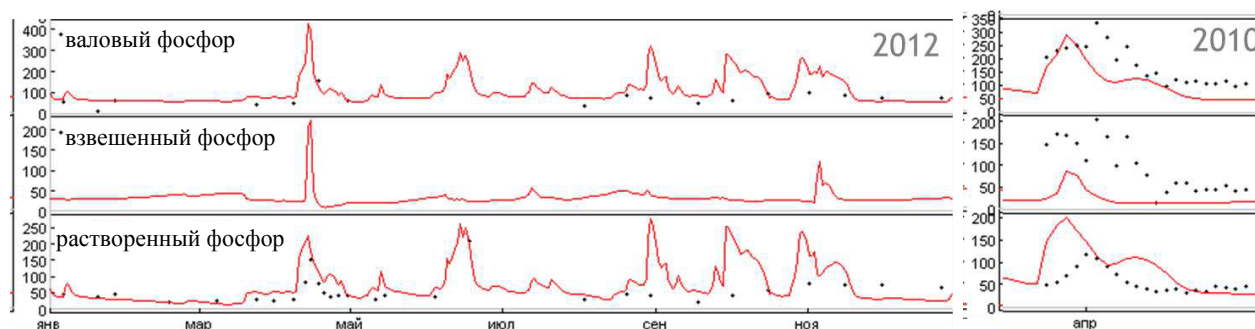


Рисунок 4. Сопоставление результатов моделирования концентраций различных форм фосфора в замыкающем створе водосбора верхней р. Москвы в 2012 и 2010 г. (верификационный период).

Для 1984 года был проведен эксперимент по увеличению количества угодий, на которых вносятся удобрения. Так для исходного варианта в модели задавалось внесение минеральных удобрений только на пашнях с интенсивным использованием и огородах (48 и 60 кг/га в год соответственно весной и 32 кг/га в конце лета только для пашен).

Таблица 4. Расчет стока фосфора года в целом и периодов повышенной водности, полученный на основе результатов моделирования концентраций фосфора в замыкающем створе.

		Многоводные			Маловодные		
		Валовый	Растворенный	Взвешенный	Валовый	Растворенный	Взвешенный
Год	Сток, кг	32907	24436	8470	12913	6543	6370
Половодье	Сток, кг	11177	8197	2980	5254	3254	2000
	Доля в году	34	34	36	37	46	29
Паводки	Сток, кг	15779	12256	3523	3987	1616	2371
	Доля в году	47	50	40	32	22	39

Хотя показатели качества для результатов эксперимента стали несколько хуже, пиковые значения летних колебаний концентраций фосфора в большем количестве случаев соответствовали наблюдаемым.

По совокупности расчетов агроклиматических характеристик и разностно-интегральной кривой среднегодовых расходов воды были выделены потенциально многоводные (2004, 2008, 2009, 2013) и маловодные (2002, 2007, 2014, 2015) годы для расчета стока фосфора на основе результатов моделирования. 2012 год, который в данном исследовании служит опорным в ряде экспериментов с моделью также является многоводным.

Таблица 5. Расчет стока фосфора, полученный по модельным и по наблюдённым данным.

	По модели		По наблюдениям		Ошибка, %	
	2012	1984	2012	1984	2012	1984
Годовой сток						
Сток РФ, кг	26543	16810	15952	18448	66	-9
Сток ВФ, кг	36015	28257	20425	22262	76	27
Сток воды, млн т	250,14	190,12	221,64	190,14	13	0
Сток за половодье						
Сток РФ, кг	8412	3203	6287	8117	34	-61
Сток ВФ, кг	11245	6387	11818	10117	-5	-37
Сток воды, млн т	74,92	38,55	94,07	65,83	-20	-41

Анализ таблицы 4 позволяет сделать вывод о том, что доля стока всех форм фосфора паводочного периода в году больше в многоводные годы. В маловодные годы возрастает доля растворенного фосфора в стоке половодья. Расчет удельного стока, то есть отношения стока фосфора за период к объему водного стока за этот же период имеет размерность концентрации и показывает скорость роста нагрузки химическим веществом при увеличении водного стока. В многоводные годы удельный сток растворенного фосфора в 1.9 раз выше, чем в маловодные. Паводочный удельный сток растворенного фосфора в 2.4 раза выше в многоводные годы, для стока половодья – в 1.7 раз выше. Удельный сток паводочного взвешенного фосфора в маловодные годы в четыре раза превышает ту же величину в маловодные. Это позволяет сделать вывод о

том, что снижение водности года влечет за собой снижение интенсивности выноса растворенного фосфора, но не уменьшает интенсивность выноса взвешенного.

При сопоставлении стока фосфора, рассчитанного с использованием расчетов модели с наблюдаемыми значениями для 2012 и 1984 гг. ошибка расчета изменялась по модулю от 0 до 76% для различных случаев (см. табл. 5). Ошибка была существенно больше для 2012 года при расчете годового стока. Расчет стока половодья, напротив, показал лучшие результаты для 2012 года. При этом увеличение ошибки расчета водного стока соответствует увеличению ошибки расчета стока фосфора, что говорит о её значимом вкладе.

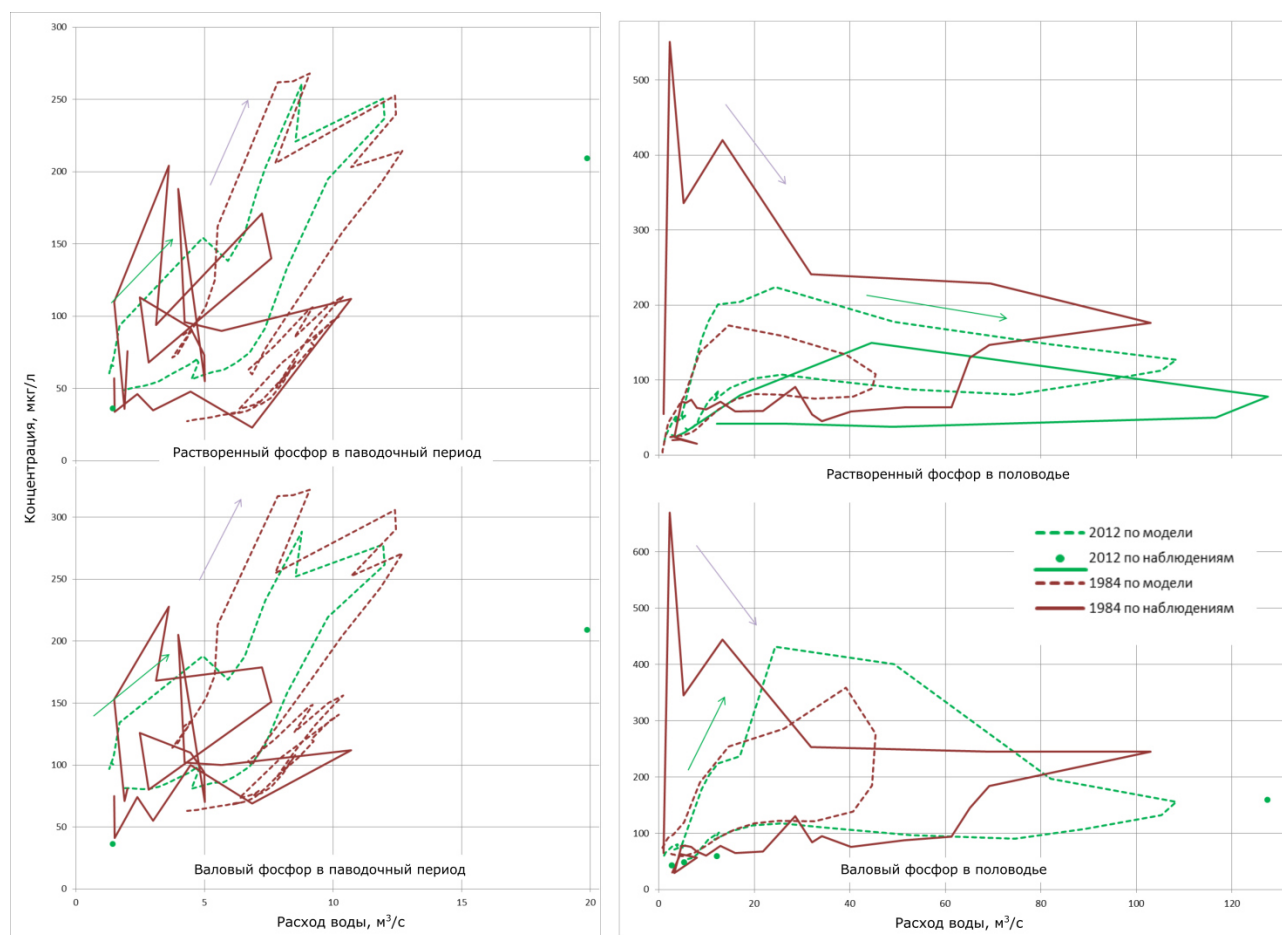


Рисунок 5. Связи концентрации фосфора с расходами воды в 1984 и 2012 годах в периоды паводков и половодий для растворенного и валового фосфора.

Отмена весеннего внесения удобрений по результатам экспериментов на модели при сравнении с результатами с внесением на интенсивно

используемых угодьях приводит к уменьшению стока растворенного фосфора в весенний период на 5% в многоводные годы, на 11% в маловодные, что составляет соответственно около 410 и 360 кг в год. Отмена летнего внесения удобрений вызывает в паводочные периоды уменьшение стока растворенного фосфора на 10% (1200 кг) в многоводные годы, на 12% (190 кг) в маловодные. Это в очередной раз подчеркивает повышенное влияние водности года на сток фосфора в период паводков.

Таблица 5. Средние и максимальные значения среднесезонного выноса валового и растворенного фосфора в годы с различной водностью весеннего и летнего периодов, кг/км² в месяц.

		Валовый		Растворенный	
		Маловодные	Многоводные	Маловодные	Многоводные
ЛЕТО	Максимальное	5,15	15,4	3,2	9,1
	Среднее	0,91	3,4	0,49	2,2
ВЕСНА	Максимальное	9,46	16,6	6,7	11,7
	Среднее	3,8	6,3	2,7	4,9

По результатам моделирования были построены связи концентраций фосфора с расходом воды. Подобные связи характеризуют процесс выноса фосфора в течение многоводного периода и несут в себе информацию о влиянии расположения земель на территории водосбора, а также водности года на сток биогенных веществ. Связи имеют характерные для фосфора форму петель гистерезиса и хронологически направлены по часовой стрелке. Анализ связей показал наличие относительно устойчивой связи в многоводные годы на подъеме половодья для валовой формы фосфора, а также на подъеме и спаде для растворенного фосфора. Подобные связи были построены и для периодов с наблюдениями (см. рис 5). В модели не проявилась ситуация быстрого истощения в 1984 г, когда, после быстрого увеличения концентрации

взвешенного фосфора, происходит резкое её убывание ещё при растущем расходе.

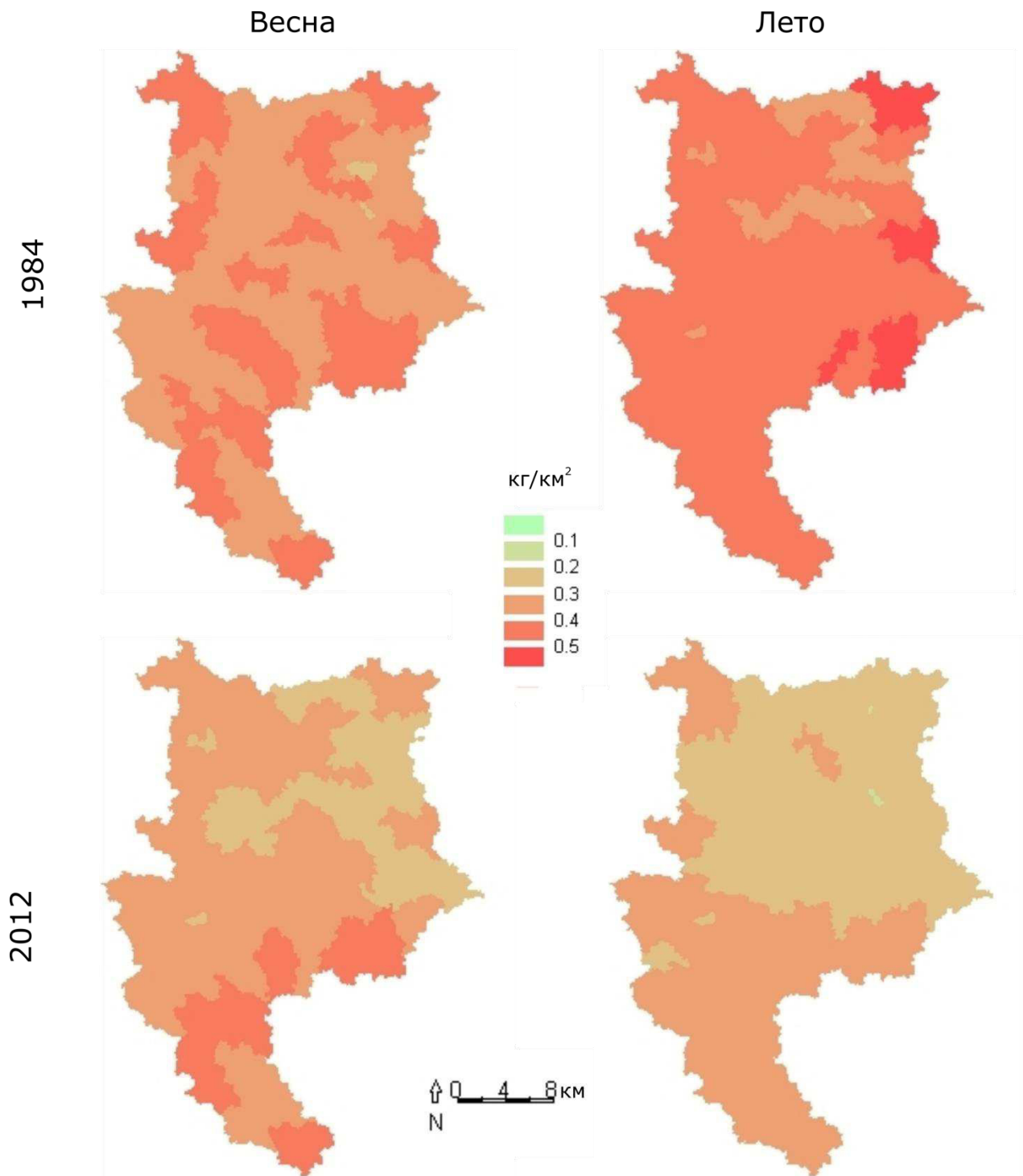


Рисунок 6. Карты выноса валового фосфора с грунтовой составляющей водного стока в kg/km^2 в летний и весенний периоды 1984 и 2012 гг. для территории водосбора р. Москвы по результатам моделирования.

При этом в паводочный период логика связи, построенной по наблюдаемым данным, не соответствует обычно наблюдаемой, тогда как модель воспроизводит обычную ситуацию гистерезиса по часовой стрелке.

Вынос биогенных веществ с территории водосбора происходит неравномерно, поэтому анализ пространственных различий биогенной нагрузки даёт информацию, необходимую для оптимизации размещения угодий и режимов их обработки.

Анализ среднесезонного выноса фосфора показывает пропорциональное его увеличение для всего водосбора в годы высокой водности по сравнению с годами малой водности для половодья (см. табл. 5) и существенно бóльшие различия в выносе фосфора для летнего периода. В летний период 1984 года в стоке валового фосфора выделяются области на востоке бассейна. При этом территории, приуроченные к нижней части водосбора р. Москва с большой долей пашен с интенсивным освоением, сельских поселений, малыми уклонами субводосборов и русел, в отношении выноса фосфора полностью отражают картину распределения поверхностного стока, рассчитанного моделью. В весенний же период картина выноса фосфора с поверхностным стоком в меньшей степени соответствует распределению поверхностного стока, что говорит о более сильном влиянии на вынос фосфора сельскохозяйственного освоения территорий в период половодья.

Таблица 6. Вынос валового фосфора с генетическими составляющими стока для летнего и весеннего периодов в 2012 и 1984 гг. в кг/км²

Составляющие	1984		2012	
	Весна	Лето	Весна	Лето
Средние				
Склоновая	0.51	0.40	1.94	0.02
Почвенная	3.22	5.90	4.29	1.94
Грунтовая	0.39	0.44	0.33	0.29
Суммарно	4.12	6.74	6.56	2.25
Максимальные				
Склоновая	1.57	3.73	6.06	0.29
Грунтовая	0.49	0.60	0.46	0.38

Анализ генетических составляющих химического стока служит ключевым этапом для детального понимания происхождения выносимых веществ и путей их выноса. Склоновая составляющая стока валового фосфора изменчива, как и склоновый водный сток, достигая летом 1984 года на отдельных территориях 6 кг с км^2 , а летом 2012 года опускаясь в среднем по водосбору почти до нуля (см. табл. 6).

Вынос валового фосфора с грунтовыми водами (см. рис. 6) отличают его повышенные значения в верховьях водосбора в летние периоды и равномерное распределение по территории в весенние периоды. В целом видно перераспределение стока фосфора в 1984 году в пользу грунтовой составляющей, а в 2012 в пользу поверхностной, что вызвано повышенной водностью 2012 года. Области повышенного грунтового стока фосфора в верховьях водосбора в 2012 году характеризуются большими уклонами склонов и меньшей удаленностью водоразделов от речной сети, что выражается в уменьшении времени добегания. Участки повышенного стока валового фосфора, которые особенно хорошо выделяются на картах 1984 года приурочены к залесенным территориям водосбора. Таким образом, сток с сельскохозяйственных угодий в большей степени сопряжен с поверхностной составляющей, а сток с лесных территорий – с грунтовой. Это объясняется повышенной скоростью выноса фосфора удобрений и взвешенного фосфора с открытых сельскохозяйственных территорий и, напротив, ограничением выноса взвешенного фосфора и более глубокой миграцией фосфора в почвенном профиле на залесенных участках.

Количественное сопоставление местного стока фосфора и валовой фосфорной нагрузки на грунтовые воды позволяет заключить, что вынос в грунтовые воды составляет от 10 до 30% от общего выноса с местным стоком для средних по водосбору значений и от 4 до 12% для максимальных значений. Валовая фосфорная нагрузка на грунтовые воды достаточно постоянна и составляет в среднем 0.65 кг/км^2 , максимально до 1.4 кг/км^2 .

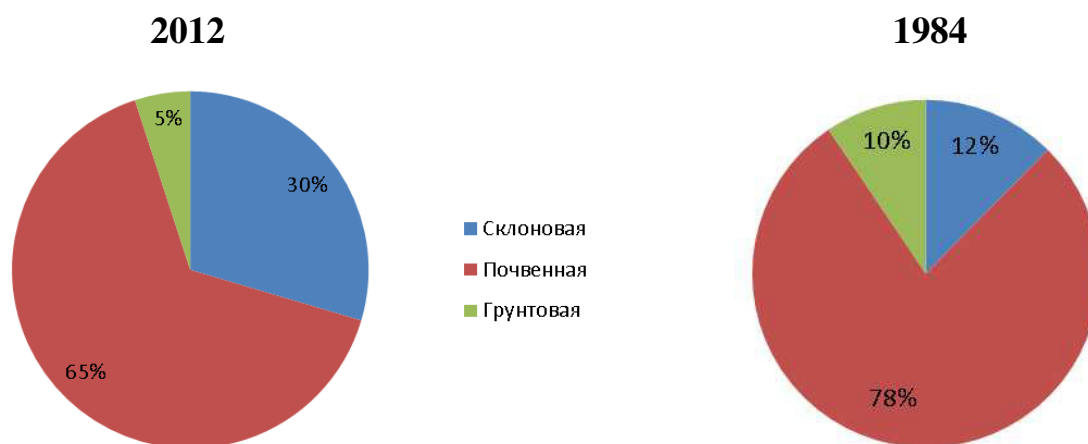


Рисунок 7. Доли генетических составляющих стока в выносе валового фосфора в речную сеть водосбора для весеннего периода 1984 и 2012 гг. по результатам моделирования.

В стоке валового фосфора с водосбора почвенная составляющая преобладает (см. рис. 7). Для водного стока в 1984 и 2012 гг. устанавливаются следующие соотношения между генетическими типами вод: в весенний период с более низким по результатам моделирования половодьем склоновый сток составляет 12%, грунтовый – 21%, в многоводном 2012 году склоновая составляющая увеличивается до 25%. Почвенный сток в половодье находится на уровне 67%. В летний период склоновый сток не превышает 4% от суммарного, а грунтовая и почвенная составляющие соотносятся как 1 к 2. В исследовании К.К. Эдельштейна, О.Ю. Смаhtiной авторами для бассейна верхней р. Москвы были получены средние по исследованным пробам доли склоновой составляющей водного стока на спаде половодья 55%, почвенной – 2%, грунтовой – 43%. Для паводочных периодов генетические составляющие соотносятся как 40 – 60%, 26 – 30% и 15 – 30%. Между тем, для некоторых проб, отобранных летом 1984 г. доля почвенного стока составляла до 60%.

Выводы и рекомендации

Проведенные в данной работе исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Наблюдаемые межгодовые изменения агроклиматических характеристик определяют интенсивность и направленность процессов деградации почв сельскохозяйственного назначения и выноса биогенных веществ. Формирование дополнительного поверхностного и внутрипочвенного стока в холодный сезон приводит к усилению промывного режима почв и активной миграции биогенных элементов в почвенном профиле.
2. Сокращение на водосборе количества используемых угодий и объемов вносимых удобрений привело к перераспределению питательных веществ в почве. На неиспользуемых угодьях содержание валового фосфора и азота на 15 – 20 % выше, чем на используемых, подвижного фосфора – на 50 – 70% выше, что вызвано, вероятно, прекращением культивирования растений, обеспечивавших интенсивный круговорот биогенных элементов в прикорневом слое. Регулярный вынос фосфора с речным стоком обуславливает повышенное содержание всех форм фосфора и азота на пойменных лугах.
3. Модель HYRE удовлетворительно воспроизводит ежедневные расходы воды в замыкающем створе водосбора верхней р. Москвы. Расчет годового и сезонного биогенного стока на основе результатов модели имеет относительную ошибку от 10 до 75%.
4. Концентрация фосфора образует устойчивую связь с расходами воды на подъеме петли и неустойчивую, особенно в многоводные годы, на спаде. Для растворенной формы устойчивость связи на спаде выше.
5. Отмена внесения удобрений на интенсивно используемых угодьях по результатам моделирования приводит к уменьшению стока растворенного фосфора в весенний период на 5% в многоводные годы, на 11% в маловодные, в паводочные периоды уменьшение происходит на 10% в многоводные годы, на 12% в маловодные. Годовой сток валового фосфора снижается на 7 – 8 %.
6. Валовая фосфорная нагрузка на грунтовые воды составляет от 10 до 30% общего местного стока фосфора для средних по водосбору значений и от 4

до 12% для максимальных значений. В генетической структуре стока валового фосфора 60 – 80% занимает почвенный сток, склоновая и грунтовая составляющая сопоставимы по величине.

Рекомендации.

1. Разработанную методику адаптации модели HYPE можно рекомендовать к применению в сельскохозяйственном проектировании. Совместно с моделью трансформации вещества в водохранилищах данная методика может использоваться для непосредственного исследования процессов эвтрофирования.

2. При сельскохозяйственном освоении территории рекомендуется удаление интенсивно используемых угодий, дающих наибольшую биогенную нагрузку, от речных русел и создание буферных зон для задержания биогенных элементов. При внесении минеральных удобрений рекомендуется корректировка времени их применения с учетом прогнозируемых сроков и объема половодья.

3. В условиях усиления промывного режима почв, уменьшения выноса растворённого фосфора в половодье, увеличения паводочного смыва взвешенного фосфора, особенно остро проявляющегося в многоводные годы, для сокращения выноса биогенных элементов рекомендуется пересмотр норм вносимых минеральных удобрений, а также набора выращиваемых культур.

Список публикаций

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Ясинский Н.С., Даценко Ю.С. Закономерности формирования речного стока фосфора для целей гидрологического моделирования. Природообустройство. 2018. – № 1. – С. 25 – 33.
2. Ясинский Н.С., Белолубцев А.И. Гидрофизических характеристик почв для моделирования основных гидрологических процессов на водосборе Можайского водохранилища. Естественные и технические науки. 2019. – № 3 (129). – С. 144 – 149.
3. Nikolay S. Yasinskiy, Oksana N. Erina, Dmitry I. Sokolov, Alexander I. Belolubtsev Modelling phosphorus flow to the Mozhayskoe reservoir with the HYPE hydrological model. Geography, Environment, Sustainability. 2019. – Vol.12, Issue 4 (в печати).

Статьи в других изданиях:

4. Ясинский Н.С., Заславская М.Б. Расчет стока фосфора в водоемы в условиях недостатка данных режимных наблюдений. // Современные проблемы исследований водохранилищ. — Пермский ун-т, 2005. — С. 86 – 88.
5. Ефимова Л. Е. , Ясинский Н. С. , Терский П. Н. и др. Изменение стока в Коровинской губе Печорского моря в летний период // Тезисы докладов XVI Международной школы морской геологии. — Т. 1. — ГЕОС Москва, 2005. — С. 66–67.
6. Yasinskiy N. Les processus du cycle du phosphore dans les modèles du qualité d'eau. // Сборник статей Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 100-летию И. С. Шатилова, РГАУ-МСХА, 2017. – С. 164 – 165.
7. Ясинский Н.С. Создание подблока гидрологической модели Ecomag для расчета стока фосфора. // Сборник статей Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 100-летию И. С. Шатилова, РГАУ-МСХА, 2017. – С. 348 – 349.
8. Ясинский Н.С. Разработка блока миграции фосфора в речной системе на основе модели гидрологического цикла ЕСОМАГ. РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ: ТРАДИЦИИ И ИННОВАЦИИ // Материалы II Международной конференции, КДУ (Москва). 2017. – С. 228 – 231.
9. Ясинский Н.С., Белолубцев А.И. Моделирование биогенного стока как инструмент оптимального управления в сельском хозяйстве РФ. // Доклады Тимирязевской сельскохозяйственной академии, Издательство: РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева (Москва). 2017. – С. 5 – 7.
10. Новые подходы к оперативному расчету речного стока в системе GISMETEO.HYDRO. // ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И КЛИМАТ, материалы докладов V Международного Водного Форума : в 2 ч.. Минск, 2017. – С. 146 – 149.