

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Мотовилова Юрия Георгиевича «Система физико-математических моделей формирования стока и ее применение в задачах гидрологических расчетов и прогнозов» по специальности 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия на соискание ученой степени доктора географических наук.

1. Актуальность избранной темы

Разработка адекватной физико-математической модели гидрологической системы речного бассейна относится к «одной из наиболее трудных задач геофизики» [Кучмент, 2008], которая все еще далека от своего решения. В настоящей работе рассмотрена задача создания крупномасштабной модели, описывающей гидрологический цикл крупных речных бассейнов со смешанным дождевым и снеговым питанием, в том числе и для не охваченных наблюдениями районов. Такие модели автор называет региональными гидрологическими моделями. На базе разработанных автором гидрологической модели ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics) и соответствующего информационно-моделирующего комплекса (ИМК) построены региональные гидрологические модели для крупнейших отечественных и зарубежных речных бассейнов, превосходящих по площади миллион квадратных километров.

Актуальность диссертации Ю.Г. Мотовилова сомнений не вызывает. Появление такого исследования следует признать чрезвычайно своевременным и рассматривать его как пример развития физико-математических моделей в направлении решения современных научных гидрологических проблем, расширения области применения моделей для крупнейших речных бассейнов России и создания новых методов и технологий решения актуальных прикладных водохозяйственных задач.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций базируется на глубоком анализе литературы, осмыслении и обобщении опыта отечественных и зарубежных исследований по теме диссертации, а также на результатах собственных многолетних исследований автора. Работа выполнена на современном научном уровне. Основу разработанной модели составляют математические выражения, являющиеся следствием фундаментальных физических законов сохранения массы и энергии. Модель имеет свидетельство о государственной регистрации. Полученные результаты достаточно полно представлены в научной литературе в виде монографий и статей, многократно обсуждались и получили заслуженную положительную оценку на различных отечественных и международных семинарах и конференциях.

3. Новизна и достоверность исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Разработана и доведена до технологического уровня физико-математическая модель формирования стока ECOMAG – первая отечественная физико-математическая модель, которая позволяет воспроизводить и прогнозировать гидрографы талого и дождевого стока с крупных водосборов, а также рассчитывать динамику полей гидрологических переменных (речного стока, характеристик снежного покрова, влажности почвы и др.) с высоким пространственным разрешением и с удовлетворительной точностью. При этом разработанная модель опирается на данные стандартного отечественного гидрометеорологического мониторинга. На сегодняшний день это единственная отечественная разработка, которая позволяет успешно конкурировать с развитыми зарубежными гидрологическими моделями типа SWAT, SWIM, SHE и другими. Модель ECOMAG может служить единой методической основой

гидрологических расчетов и прогнозов в отличии от современных методов, традиционно опирающихся на существенно различные методические подходы.

Впервые построены региональные физико-математические полураспределенные модели формирования стока для четырех крупнейших речных бассейнов северного полушария (Волги, Лены, Амура и Маккензи), расположенных в различных физико-географических зонах с различными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов. На основе созданной модели разработаны новые методы и технологии решения актуальных задач управления водноресурсными системами, а также методы и технологии краткосрочного прогноза притока воды в водохранилища.

Достоверность расчетов по модели ECOMAG подтверждается результатами сравнения данных натурных наблюдений и рассчитанных гидрологических характеристик. На каждом временном шаге осуществляется моделирование характеристик стока во всех модельных ячейках водосбора, поэтому в рамках одного расчета имеется возможность сопоставления рассчитанных и измеренных гидрографов стока во многих точках модельной речной сети, соответствующих пунктам расположения мониторинговых гидрометрических станций. Помимо использования данных о расходах воды в разных створах речной сети, возможности модели по воспроизведению полей гидрологических переменных позволяют привлекать для калибровки карты среднемноголетнего модуля стока для территории нашей страны

Для оценки соответствия рассчитанных и фактических полей характеристик водного режима в модели ECOMAG могут использоваться четыре модификации критерия Нэша-Сатклифа NSE и три модификации коэффициента корреляции Kkor. Рассчитывались значения корреляционного отношения R^2 связей рассчитанных и фактических месячных, квартальных и годовых объемов стока. Использовался также критерий PBIAS, характеризующий относительную погрешность расчета гидрографов стока.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Важным итогом диссертационного исследования является предложенный и реализованный автором метод решения проблемы масштабирования в моделировании гидрологических процессов при переходе от точки к склону и далее к элементарному водосбору и речному бассейну. Ориентируясь на построение физико-математических моделей формирования стока для крупных речных бассейнов (региональных моделей), автор предлагает решать эту проблему с использованием так называемых полураспределенных гидрологических моделей (моделей с полураспределенными параметрами). При этом вся территория речного бассейна покрывается нерегулярной сеткой из элементарных водосборов. Гидрологические процессы в пределах расчетных элементов описываются системой дифференциальных уравнений, большая часть которых получена путем интегрирования по пространству базисных уравнений детальных физико-математических моделей, либо путем отбрасывания второстепенных членов этих уравнений, либо привлечением иных упрощенных схем описания процессов, разумных в принятых пространственно временных масштабах. Полураспределенные модели сохраняют основные черты и преимущества физико-математических моделей с распределенными параметрами и, в то же время, менее требовательны к составу и полноте исходной информации, что делает их использование предпочтительным при недостаточности данных наблюдений.

Разработана компьютерная технология для информационного обеспечения поддержки принятия оптимальных управлеченческих решений по регулированию режимов работы каскадов водохранилищ комплексного назначения в оперативной практике Федерального агентства водных ресурсов. Ежегодный экономический эффект от применения технологии на Волжско-Камском каскаде водохранилищ оценивается в 200 млн руб.

Показаны положительные эффекты регулирования стока действующими Зейским и Бурейским водохранилищами на гидрологический режим Среднего Амура, оценен эффект регулирования стока с использованием резервных противопаводковых емкостей на планируемых Нижне-Зейском и Селемджинском водохранилищах. Проведены годичные оперативные испытания методов краткосрочного прогноза для Бурейского и Чебоксарского водохранилищ.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

На современном уровне развития методов моделирования и геоинформационных технологий использование физико-математических полураспределенных региональных моделей может являться средством практического решения широкого круга гидрологических задач, связанных с необходимостью перехода от точки к площади. Указанные возможности позволяют использовать региональные модели как современные инструменты решения исследовательских задач гидрологии речных бассейнов, связанных с анализом условий формирования стока в различных частях водосборов, в том числе, в неизученных районах, а также в задачах оценки полей возможных изменений стока при антропогенных воздействиях на водосбор и возможных изменениях климата.

Разработанный алгоритм информационной поддержки модели ECOMAG позволяет в зависимости от возможных сценариев гидрометеорологических воздействий, расположения и параметров действующих и планируемых водохранилищ осуществлять расчеты гидрографов стока в различных точках речной сети, на основании которых оцениваются целевые показатели планируемых схем размещения гидроузлов на соответствие требованиям по гидроэкологической безопасности и экономической целесообразности строительства. Кроме того, с помощью разработанной технологии можно проводить оценку эффекта регулирования

стока с использованием резервных противопаводковых емкостей на планируемых водохранилищах.

На базе модели ECOMAG могут выполняться краткосрочные прогнозы притока воды в водохранилища на основе использования прогнозных метеорологических данных, что особенно важно в условиях сокращения плотности гидрологической сети, и с учетом оперативной корректировки модельных прогностических расчетов на основе усвоения вновь поступающей гидрометеорологической и водохозяйственной информации в реальном масштабе времени. Разработанная технология позволяет повысить точность определения притока воды в водохранилища на краткосрочном уровне планирования водноэнергетических режимов работы гидроузлов.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенности

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Объем работы составляет 333 страницы, включая 78 рисунков и 22 таблицы. Библиографический список содержит 249 наименований. Основные положения диссертации изложены в двух монографиях и 82 статьях, в том числе в 51 статьях в рецензируемых изданиях.

В первой части работы представлены разработанные автором физико-математические модели с распределенными параметрами процессов вертикального тепло- и влагопереноса в мерзлой почве при инфильтрации в нее талых вод, а также в снежном покрове при его формировании и таянии. Кратко охарактеризованы алгоритмы и методы численной реализации уравнений тепло- и влагопереноса, новые формулы для расчета гидро- и теплофизических характеристик талых и мерзлых почв и снежного покрова. Показаны возможности разработанных моделей и алгоритмов для построения и реализации физико-математической модели формирования стока весеннего половодья на примере водосбора р. Сосны. Содержащиеся в этой части диссертации результаты создали необходимые условия для разработки моделей процессов в различных пространственно-временных масштабах и

построения региональных гидрологических моделей в крупных речных бассейнах.

Вторая глава посвящена выбору базовой структуры модели ECOMAG. Автором вполне обоснованно за основу был принят тип полураспределенных физико-математических моделей, которые сохраняют основные черты и преимущества детальных моделей с распределенными параметрами и в то же время менее требовательны к составу и полноте исходной информации, что делает их использование предпочтительным в прикладных расчетах и при недостаточности данных наблюдений. Гидрологические процессы в пределах выделенных расчетных элементов описываются системой дифференциальных уравнений, большая часть которых получена автором путем интегрирования по пространству и упрощения базисных уравнений детальных физико-математических моделей. Особое внимание автор уделяет разработке методических приемов оценки, задания и калибровки полей модельных параметров, позволяющих смягчить эффекты эквифинальности и повысить идентифицируемость значений параметров модели ECOMAG.

Несомненной заслугой автора является создание компьютерной технологии Информационно-моделирующего комплекса ИМК ECOMAG, который включает в себя средства информационной и технологической поддержки работы расчетного модуля (электронные карты, базы данных пространственной информации и средства управления ими и т.п.). Примечательно, что имеющиеся в ИМК информационные ресурсы по объему и пространственному покрытию территории России достаточны для построения региональных гидрологических моделей и проведения расчетов для любых крупных речных бассейнов России.

В третьей главе описаны результаты испытаний алгоритмов модели ECOMAG и возможностей модели по учету пространственных неоднородностей в процессах формирования стока на региональном уровне по данным детальных полевых и экспериментальных исследований в рамках междисциплинарного международного эксперимента NOPEX, цель которого

заключалась в построении и верификации гидрологических и метеорологических моделей в различных пространственно-временных масштабах в бореальной зоне. Автор убедительно обосновывает выбор важнейших факторов, определяющих структуру гидрологической модели - масштаб и размеры репрезентативной элементарной области моделирования. В диссертации детально проиллюстрированы комплексные испытания гидрологической модели ECOMAG по данным наблюдений за речным стоком в области NOPEX, высотой снежного покрова, за динамикой влажности почвы и уровней грунтовых вод в различных частях исследуемой территории. Показано, что гидрологическая модель может быть использована с единым набором региональных параметров для расчетов гидрографов стока как на изученных, так и неизученных речных бассейнах в условиях меняющегося климата и при антропогенных изменениях речных бассейнов в широком диапазоне размеров моделируемых объектов: от достаточно крупных рек до мелких ручьев.

В четвертой, самой большой главе диссертации рассмотрен опыт применения модели ECOMAG для построения региональных моделей и моделирования полей характеристик гидрологического цикла в ряде крупнейших речных бассейнов северного полушария: Волги, Лены, Амура и Маккензи. Географические масштабы и размеры приложений модели поражают и не имеют аналогов в гидрологической практике. Автором выполнено исследование физических механизмов и проведен пространственно-временной анализ условий формирования стока в речных бассейнах на основе моделирования динамики полей характеристик гидрологического цикла суши (снежного покрова, влажности почвы, испарения, речного стока). Отдельного внимания в условиях недостатка данных гидрометеорологических наблюдений и сокращения мониторинговой гидрометрической сети заслуживают исследования автора по моделированию полей и построению карт среднемноголетних гидрологических характеристик (модулей стока, расходов воды в речной сети) по

метеорологическим данным в том числе в не охваченных гидрометрическими наблюдениями районах.

В заключительной, пятой главе диссертации показаны возможности разработанной модели и соответствующего информационно-моделирующего комплекса как инструментов решения актуальных проблем гидрологических расчетов и прогнозов, связанных с необходимостью получения надежных пространственно-временных оценок и прогнозов речного стока и других составляющих гидрологического цикла речных бассейнов. В частности, рассмотрены созданные на основе ИМК ECOMAG новые методы и технологии оценки опасности наводнений и противопаводкового эффекта водохранилищ, технологии оперативного управления действующими водноресурсными системами, технологии ансамблевого долгосрочного и краткосрочного прогноза притока воды в водохранилища с использованием прогнозных метеорологических данных, что особенно важно в условиях сокращения плотности отечественной гидрологической сети.

Заключение диссертации содержит концентрированное изложение результатов исследования проблем, связанных с защищаемыми положениями.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Содержание диссертации и автореферата полностью отражает основные этапы проведенного автором исследования и полученные результаты, вынесенные на защиту. Изложение материалов характеризуется четкостью, логичностью и завершенностью.

По диссертации имеется несколько замечаний и вопросов, возникших в процессе при прочтении текста работы.

- При моделировании гидротермического режима почвы для расчета фазового состава влаги при отрицательных температурах автором была предложена формула (1.35), которая показывает зависимость

льдистости почвы от температуры и суммарного влагосодержания. В то же время, как показано в диссертации, в более поздних работах в моделях ИВП РАН А.Н. Гельфана и сотрудников ГГИ Ю.А. Зарецкого и С.А. Лаврова зависимость льдистости почвы от суммарного влагосодержания не учитывается. Здесь необходимы комментарии диссертанта по поводу возможных эффектов тех или иных методов задания количества незамерзшей влаги в моделях инфильтрации талых вод в мерзлую почву.

- При первых испытаниях модели ECOMAG по данным детальных наблюдений в рамках проекта NOPEX (глава 3) остается неясным, каким образом результаты моделирования характеристик гидрологического цикла для расчетных площадок масштаба REA (2x2 км) отождествляются и сравниваются с данными наблюдений на этих площадках.
- В разделе 4.2 сравниваются карты фактического и рассчитанного по модели полей модуля стока в бассейне Лены. Показана сложная топография полей и резкие контрасты - наподобие метеорологических фронтов - при переходах от областей с чрезвычайно низкими модулями стока, к районам с высокими его значениями (колебания от 0.5 до 25 л/(с×км²)). Из диссертации остается неясным, являются ли такие контрасты следствием контрастов в распределении слоев осадков или же здесь накладываются изменения в условиях формирования стока.
- В разделе 5.1 при моделировании стока реки Амур вдруг возникает модель MIKE 11. Почему именно в этой задаче и почему именно MIKE 11?
- «ЭКО» в названии модели требует использования биотических компонентов или, по крайней мере, ориентации на решение экологических задач, связанных с экосистемными оценками. Планируют ли авторы модели дальнейшее совершенствование модели

и расширение ее области применения в направлении решения не только гидрологических, но и экологических задач?

Приведенные критические замечания и поставленные вопросы не снижают высокой оценки научной и практической значимости работы.

8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Мотовилова Юрия Георгиевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, в сочетании с новыми научно обоснованными технологическими решениями, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора географических наук.

Официальный оппонент,

Академик РАН, проф., научный руководитель Федерального государственного учреждения науки Института озероведения Российской Академии наук (ИНОЗ РАН), 196105 Санкт-Петербург, ул. Севастьянова д.9, тел. (812) 387-0260, адрес электронной почты rum.ran@mail.ru

В.А. Румянцев.

(подпись)

М.П.



11 марта 2019 г.

Подпись руки Румянцева В.А.
заверяю Григорьеву Е.И.