

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Мотовилова Юрия Георгиевича

«Система физико-математических моделей формирования речного стока и ее применение в задачах гидрологических расчетов и прогнозов» представленную на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 25.00.27- гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Актуальность исследования обусловлена необходимостью дальнейшего развития методических подходов к разработке физико-математических моделей речных бассейнов вследствие их сложной пространственной организации, нелинейности гидрологических процессов, чувствительности к антропогенным воздействиям и, наконец, недостаточности исходной гидрометеорологической информации. Диссертация основывается на предшествующих результатах в области математического моделирования гидрологических процессов, представленных в работах отечественных и зарубежных авторов («Динамическая гидрология» П. Иглсона, «Математическое моделирование речного стока» Л.С. Кучмента и других исследователей).

Диссертант развивает концепцию «агрегирования процессов», в рамках которой элементарный водосбор (водосбор малой реки) может являться расчетной единицей для моделирования крупного речного бассейна, что позволяет учесть пространственную изменчивость стокообразования.

Рассматривая дискуссии вокруг физико-математических моделей, диссертант указывает, что суть претензий к ним – неадекватное описание ряда гидрологических процессов уравнениями математической физики, и их применение на реальных водосборах для несвойственных пространственных масштабов, что требует их калибровки. Примеры –

- уравнение движения почвенной влаги *Ричардса* в условиях значительной пространственной вариации гидрофизических характеристик почв;
- гипотеза плоскостного стекания, которая не учитывает элементы русловой сети высоких порядков;
- проблема эквивиальности – калибровки при ограниченности исходных данных;
- проблема масштаба, возникающая при гидрологическом моделировании крупных речных систем, и другие.

Диссертант обсуждает и предлагает пути решения упомянутых проблем.

Отталкиваясь от результатов классических исследований Андерсона, Кузьмина, Кучмента, Павлова и др., диссертант разрабатывает физико-математическую модель формирования снежного покрова и снеготаяния, в которой

- снег рассматривается как деформируемая дисперсная пористая среда из кристаллов льда и жидкой воды;
- при отрицательных температурах воды в снеге нет;
- перенос влаги в снежной толще происходит под действием гравитации;
- вся коротковолновая радиация поглощается на поверхности снежного покрова;
- теплообмен внутри снежного покрова осуществляется главным образом путем кондуктивного теплопереноса и поглощения проникающей в снег коротковолновой радиации, а также вследствие фазовых переходов вода–лед.

Испытания модели, проведенные на снегомерной площадке ст. Ледник Абрамова, показали ее достаточно высокое качество.

Исследования гидротермического режима почвы восходит к работам Качинского, Вольфцуна, Субботина, Комарова, и других авторов. В диссертации представлен достаточно полный обзор по этой проблеме. Детальная физико-математическая модель тепло- и влагопереноса в мерзлой почве при инфильтрации талой воды, основанная на методах термодинамики пористых сред, была впервые реализована в работе автора диссертации (1977). Модель позволила с удовлетворительной точностью воспроизвести широко известные результаты лабораторных экспериментов по инфильтрации воды в мерзлую почву В.Д. Комарова, а также результаты, полученные в гидрофизической лаборатории ГГИ. В последующие годы были разработаны ряд моделей тепло- и влагопереноса ([Зарецкий, Лавров, 1986; Гельфан (2006) и др. ]), близких по структуре к предложенной в диссертации.

Склоновое и русловое стекание описываются в модели системой уравнений кинематической волны.

Рассмотренная в диссертации *детальная модель формирования стока* весеннего половодья основана на конечноэлементной схематизации водосборной площади [Демидов, Мотовилов, 1984]. Привлекались топографическая, почвенная, ландшафтная карты и справочники агрогидрологических свойств почв. Расчеты выполнялись на примере

бассейна лесостепной реки Сосны (центральная часть лесостепной зоны ЕТС), на поверхности которого выделено 300 конечных элементов. Использовались материалы снегомерных съемок и профили температуры и влажности почвы перед началом снеготаяния. Граничные условия задавались по метеорологическим данным. Для каждого элемента площади вводились статистические распределения снегозапасов и глубины промерзания почвы в начальный момент времени. Для определения потерь талых вод на задержание в неравномерно распределенных бессточных емкостях рельефа использовалась модель Е.Г. Попова [1963]. Шаг интегрирования по времени для уравнений тепло- и влагопереноса в снеге и почве принят равным 1 часу, а для стекания по уравнениям кинематической волны – 6 часов.

Расчеты для 10-летнего ряда (1967–1976 гг.) показали достаточно хорошее соответствие рассчитанных и фактических слоев талого стока.

С помощью физико-математической модели исследовано влияние возможных климатических изменений на характеристики талого стока на примере бассейна р. Сосны. Расчеты показали, что при увеличении температуры воздуха и осадков с большей вероятностью следует ожидать уменьшения весеннего талого стока и увеличения стока в периоды зимних оттепелей.

Основное содержание диссертации посвящено созданию и реализации модели прикладной геофизики – ECOMAG. В модели учитываются следующие процессы: формирование снежного покрова и снеготаяние, инфильтрация воды в почву и испарение, термический и водный режим почвы, формирование поверхностного, внутрпочвенного, грунтового и речного стока.

Поверхность бассейна разделяется нерегулярной сеткой на отдельные расчетные элементы с учетом особенностей рельефа и структуры речной сети. Моделирование гидрологических процессов на каждом расчетном элементе выполняется для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его слоя (горизонт Б), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова. В модели впервые

- большая часть физически обоснованных параметров (почвы, растительность, ландшафты) определяется на основе глобальных баз картографических данных;
- калибровка параметров выполняется не для элементарных водосборов, слагающих крупные речные бассейны, а для типов характеристик подстилающей поверхности (почв, растительности, ландшафтов);

- поэтапная калибровка и корректировка параметров моделей, ответственных за определенные процессы, проводятся по данным регионального мониторинга этих процессов;
- для сокращения количества параметров калибровка выполняется для множителей к абсолютным значениям параметров характеристик подстилающей поверхности (а не для абсолютных значений этих параметров), что позволяет сохранить соотношения между ними.

Диссертантом разработана компьютерная программа Информационно-моделирующего комплекса ИМК ЕСОМАГ, включающая расчетный модуль и средства информационной поддержки его работы, в том числе

- тематические электронные карты,
- технологии автоматизированного разбиения водосборной площади на элементарные водосборы и схематизации речной сети,
- базы данных характеристик подстилающей поверхности,
- гидрометеорологической и водохозяйственной информации,
- средства управления базами данных и геоинформационной обработки пространственной информации.

Калибровки и испытания разработанных алгоритмов ЕСОМАГ, исследование и реализация возможностей учета пространственных неоднородностей на региональном уровне, проводились на основе данных междисциплинарного международного эксперимента NOPEX (*Климатические процессы северного полушария – эксперимент "суша-поверхность"*), в проведении которого диссертант принимал непосредственное участие.

Входом в ЕСОМАГ являются поля метеоданных (осадки, температура и дефицит влажности воздуха) на территорию полигона NOPEX. Модель в непрерывном режиме рассчитывает поля снежного покрова, снеготаяния, увлажнения и промерзания почвы, испарения, генетических составляющих речного стока. Детальные пространственно-распределенные многоуровневые данные эксперимента NOPEX использовались для калибровки и всесторонней проверки модели. Определение набора параметров модели ЕСОМАГ для всей области NOPEX проводилось в соответствии с методикой поэтапной калибровки. Результаты расчетов стока дали положительный результат, особенно если учесть, что данные по стоку не были использованы в процессе калибровки параметров модели. Также получено удовлетворительное соответствие значений влажности почвы и уровней грунтовых вод с рассчитанными по модели для элементарных районов («ячеек REA»).

В диссертации обстоятельно рассмотрен положительный опыт применения ECOMAG для построения региональных моделей и моделирования гидрографов и полей характеристик гидрологического цикла для крупнейших речных бассейнов: Волги, Лены, Амура и Маккензи. Для р. Маккензи потребовалось включение в оригинальную версию модели ECOMAG двух дополнительных блоков, первый из которых описывает регулирование стока имеющимися в бассейне крупными озерами, а второй блок – летнее питание левобережных притоков р. Маккензи за счет таяния ледников и снежников в высокогорных областях.

Получили успешное развитие новые методы и технологии, созданные на базе ECOMAG для решения водохозяйственных задач оценки опасности наводнений и противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ и прогнозов притока воды к ним. Основу технологий составляют:

- физико-математическая модель формирования стока ECOMAG,
- одномерная гидродинамическая модель неустановившегося движения воды в речном русле, основанная на решении уравнений Сен-Венана,
- базы данных гидрометеорологической, водохозяйственной и картографической информации и соответствующие системы управления этими базами,
- технология информационной поддержка ECOMAG при управлении каскадами водохранилищ в комплексе с моделью функционирования водохозяйственных систем, разработанной С. Е. Беднаруком.

Подведем итоги.

Диссертация Ю.Г. Мотовилова развивает методические основы решения задач гидрологических расчетов и прогнозов. В ней получила развитие концепция «агрегирования процессов», в рамках которой малый водосбор может являться расчетной единицей для моделирования крупного речного бассейна.

Диссертация представляет профессиональное исследование как с точки зрения разработки физико-математических моделей формирования речного стока для крупных речных бассейнов, находящихся в различных физико-географических условиях, так и в плане способов их информационного обеспечения, калибровки параметров, верификации, а также результатов применения этих моделей для решения практических задач.

Стержнем диссертации является разработанная автором физико-математическая модель прикладной геофизики – ECOMAG, в которой учитываются основные процессы стокообразования. ECOMAG содержит

математическую модель с упрощенными обыкновенными дифференциальными уравнениями, описывающими основные процессы стока с водосбора, и ГИС с базами данных о характеристиках территории, упорядоченной в так называемые “элементарные водосборы”, с помощью которых строится модель водосбора любого масштаба. Использование тематических карт и данных дистанционного зондирования Земли обеспечивает возможность учета в заданном масштабе основных физико-географических, почвенных и топографических особенностей бассейна. Для этого в базе данных ГИС представлен ряд слоев электронных тематических карт (рельефа, гидрографической сети, почв, ландшафтов). Цифровая модель рельефа организуется автоматически. Комплекс ЕСОМАГ в непрерывном режиме рассчитывает поля генетических составляющих речного стока, снежного покрова, увлажнения и промерзания почвы, испарения.

Диссертационная работа изложена стилистически грамотно, её автореферат полностью соответствует содержанию диссертации, многочисленные публикации по теме диссертации широко и полно освещают основные защищаемые положения (монографии, статьи в отечественных и зарубежных изданиях, методические рекомендации и др.). Достоверность результатов исследования подтверждается систематическим использованием

- обширных материалов гидрометеорологических наблюдений,
- картографических материалов,
- разработанного автором и подтвердившего свою эффективность компьютерного программного обеспечения;
- многочисленной отечественной и зарубежной специальной литературы.

Автором проделана большая работа по осмыслению, анализу и обобщению всей перечисленной информации, что повышает высокую степень достоверности научных результатов. По значимости решаемых задач и глубине рассмотрения проблем выполненное исследование полностью отвечает уровню диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 25.00.07- гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. Мотовилов Юрий Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктора географических наук по специальности 25.00.27 - «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия».

природообустройства, доктор географических наук, профессор

Подпись Д.А. Буракова заверяю



Д.А. Бураков  
руководитель

концелярия  
«Красноярский ГАУ»