

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ РАСЧЕТОВ И ПРОГНОЗОВ РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Кучмент Л.С.¹, Гельфан А.Н.¹, Кондратьев С.А.², Лавров С.А.³

¹Институт водных проблем РАН, ²Институт озераведения РАН, ³ФГБУ «ГГИ», Россия

Введение

В последние 10-15 лет модели формирования стока стали применяться практически во всех областях гидрологии и водного хозяйства. Эти модели существенно различаются детальностью описания гидрологических процессов, требуемой исходной информацией, обоснованностью, точностью и надежностью, областями возможного практического применения, однако во многих случаях они уже стали частью общепринятой технологии гидрологических расчётов и прогнозов. Наиболее очевидные успехи применения моделей формирования стока видны в области краткосрочных гидрологических прогнозов, где оказалось достаточно эффективным применение концептуальных моделей формирования талого и дождевого стока (моделей с сосредоточенными параметрами), для разработки которых основной информацией являются наблюдения на входе и выходе рассматриваемой гидрологической системы. Например, в США эти модели используются для непрерывных ежедневных прогнозов речного стока по метеорологическим наблюдениям и прогнозам более чем на 6000 пунктах. Значительное распространение получили концептуальные модели для краткосрочных прогнозов и в ряде европейских стран. При калибровке по длительным рядам гидрометеорологических наблюдений, которые обычно имеются при разработке прогностических методик, эти модели могут обеспечивать достаточную точность и надежность прогнозов. Однако в гидрологии есть целый ряд задач, для которых возможности концептуальных моделей ограничены из-за заложенных в них весьма упрощенных представлений о гидрологических процессах и недостатка данных наблюдений. Для предвычисления возможных катастрофических наводнений, оценки влияния деятельности человека на гидрологический цикл и управление им, описания формирования качества воды на водосборе и многих других гидрологических задач необходимо детальное пространственное воспроизведение основных физических процессов, что требует разработки физико-математических моделей с распределенными параметрами, позволяющих в количественной форме синтезировать основные сформировавшиеся представления о физике гидрологических явлений. Большая часть физических констант и параметров физико-математических моделей может быть задана по данным прямых измерений. Вместо остальных параметров используются их эффективные значения, позволяющие учитывать

процессы, не описываемые моделью, и ошибки, связанные с неполнотой исходной информации. При наличии наблюдений за составляющими гидрологического цикла некоторые эффективные параметры могут быть найдены путем подбора (калибровки), однако эти значения могут меняться в большом диапазоне, что создает значительные трудности при переходе на площади или водосборы, не охваченные наблюдениями составляющих водного баланса. По мере уточнения описания физико-математической моделью природных явлений эффективные значения параметров приближаются по значениям и физическому смыслу к измеряемым величинам, что упрощает проблему их задания для разных условий окружающей среды. Пространственная неоднородность условий на речном водосборе, отсутствие достаточной информации об этих характеристиках и внешних воздействий на гидрологические системы, разнообразие гидрологических процессов и их недостаточная изученность делает построение физико-математических моделей формирования стока и качества воды одной из наиболее трудных задач геофизики. Однако накопление экспериментальных данных, развитие смежных геофизических наук, а также совершенствование вычислительной техники и компьютерного моделирования способствовали в последнее десятилетие значительному продвижению в этой области. Национальной службой погоды (НСП) США было организовано сравнение расчетов гидрографа стока по нескольким физико-математическим моделям формирования дождевого стока с расчетами, проведенными по концептуальным моделям. Было показано, что физико-математические модели позволяют получать более точные и детальные краткосрочные прогнозы стока (см., например, Reed et al., 2004). В настоящее время НСП осуществляет переход от использования концептуальных моделей к физико-математическим моделям с распределенными параметрами, позволяющим учитывать пространственное изменение характеристик водосбора и метеоданных, включающих радарные измерения осадков.

К сожалению, в России за последние десятилетия наметилось отставание в практическом использовании моделей формирования стока. Однако возможности использования зарубежного опыта и достижений мировой гидрологической науки при решения практических задач для физико-географических условий России весьма ограничены из-за того, что в подавляющем большинстве стран (за исключением Канады, части США и части Скандинавии) основные исследования связаны с описанием процессов формирования дождевого стока. В то же время уровень российских работ в области исследования и моделирования процессов формирования речного стока остается близким к мировому, а в области исследования и моделирования наиболее важного для России талого стока сохраняет лидирующие позиции. Исследование условий формирования весеннего половодья на равнинных реках,

разработка его физико-математических моделей и применение этих моделей для создания методов управления водным режимом в период прохождения весеннего половодья – задачи, которым всегда уделялось важное внимание в процессе развития научной гидрологии в нашей стране.

Ниже мы рассмотрим основные результаты по разработке и применению за последнее десятилетие физико-математических моделей формирования речного стока, ограничиваясь задачами, где их применение оказалось наиболее эффективным: 1) предвычисление риска и масштабов возможных опасных наводнений, 2) оценки влияния деятельности человека на речной сток, 3) ансамблевые гидрологические прогнозы, 4) моделирование формирования качества воды на водосборе.

Предвычисление риска и масштабов возможных опасных наводнений.

В настоящее время в России для оценки риска катастрофических паводков и половодий используются методы, основанные на построении статистических распределений максимальных расходов воды по имеющимся рядам наблюдений за стоком и экстраполяции этих распределений в область малых вероятностей. Использование таких методов означает использование гипотез об однородности и стационарности рядов наблюдения за стоком. Однако эти условия во многих случаях не выполняются, т. к. физические механизмы формирования катастрофических наводнений существенно отличаются от механизмов формирования обычных наводнений, и условия формирования стока могут значительно меняться вследствие деятельности человека на водосборе.

Физико-математические модели формирования стока на водосборе, позволяя описывать возможное разнообразие механизмов формирования стока и учитывать изменения характеристик водосбора и климата, дают возможность производить анализ физически осуществимых ситуаций в речной системе при различных сочетаниях гидрометеорологических воздействий и состояния самого водосбора, находить те сочетания, которые приводят к катастрофическим наводнениям и рассчитывать соответствующие гидрографы стока в различных точках речного водосбора. При этом могут быть обнаружены такие ситуации, которые приводят к паводкам, значительно превышающим зафиксированные за период наблюдений, и установлены максимально возможные паводки для данного бассейна. Для задания возможных сочетаний гидрометеорологических условий, которые могут приводить к экстремальным половодьям и паводкам, необходима также методика определения возможных экстремальных (детерминистических)

гидрометеорологических величин (интенсивности осадков, снеготаяния, температуры воздуха и др.) в зависимости от физико-географической зоны и размера речного водосбора. Определяющую роль в формировании экстремально высоких половодий играет максимальная интенсивность снеготаяния за период, равный времени добегаания. В работе (Кучмент и др., 1994) показано, что максимальная интенсивность снеготаяния может быть с достаточной точностью оценена по уравнению теплового баланса тающего снежного покрова. К сожалению, серьезных исследований по определению максимально возможных осадков в нашей стране не проводилось и здесь приходится ориентироваться в основном на зарубежные работы. Детерминистические методы риска и масштабов наводнений, разработанные на основе моделей ИВП РАН, в том числе, методы оценки максимально возможных дождевых паводков и половодий представлены в работе (Кучмент и др., 2008).

Для вероятностных оценок характеристик возможных гидрографов стока одним из наиболее перспективных подходов является использование динамико-стохастических моделей формирования речного стока, где на входе физико-математических моделей формирования стока используются стохастические модели метеорологических воздействий на водосбор (так называемые «генераторы погоды»). Применение метода Монте-Карло для воспроизведения возможных последовательностей метеорологических величин по их стохастическим моделям позволяет получить ряды рассчитанных характеристик стока за длительные периоды, воспроизвести огромное разнообразие возможных сочетаний физических процессов, в том числе приводящих к экстремальным величинам характеристик стока, и оценить эти характеристики с учетом антропогенного воздействия на водосбор.

Возможности вероятностных оценок возможных размеров и риска катастрофических наводнений на основе динамико-стохастических моделей формирования стока, разрабатывавшихся в ИВП РАН, показаны в работах (Кучмент, Гельфан, 2010, Кучмент и др., 2002, 2008) на примере бассейнов рек Сейм (до пос. Рышково, водосборная площадь 7400км^2), Сосна (г. Елец, водосборная площадь 16300км^2) и Вятка (до Вятских Полян, водосборная площадь 124000км^2), значительно отличающихся размерами и физико-географическими условиями. Построение на основе метода Монте-Карло гидрологических рядов за длительные периоды позволяет свести к минимуму случайные ошибки оценок вероятностных характеристик стока, которые при коротких рядах наблюдений за стоком могут быть особенно велики для малых вероятностей превышения. Однако при этом не устраняются ошибки вычислений характеристик стока, связанные с адекватностью используемых моделей и точностью калибровки их параметров. Эти ошибки могут быть

заметно уменьшены при привлечении новой информации, которая обычно используется при определении рассмотренных выше детерминистических оценок, в частности, оценок максимально возможного стока. Так, в работе (Кучмент, Гельфан, 2010) для аппроксимации вероятностей превышения максимального расхода, рассчитанных с помощью динамико-стохастической модели, использовалось четырехпараметрическое S_B распределение Джонсона, в котором в качестве верхнего предела задавался максимально возможный расход талого стока. Этот расход определялся детерминистическим путем с помощью физико-математической модели при условии, что снегозапасы достаточно велики, потери стока на впитывание в почву малы, и определяющую роль играет максимально возможная интенсивность снеготаяния за период, равный времени добегания.

Оценки влияния деятельности человека на формирования стока.

Получение надежных выводов о гидрологических последствиях антропогенных воздействий на речной бассейн на основе имеющихся наблюдений (в том числе, наблюдений на парных экспериментальных водосборах) и их обобщение на другие территории затруднено вследствие малой продолжительности наблюдений за речным стоком в изменившихся условиях при значительной природной пространственной и временной изменчивости гидрологических систем. Преодоление этих трудностей и получения более надежных оценок возможного влияния различных видов деятельности человека возможно путем использования моделей формирования стока, учитывающие особенности этого влияния и изменения характеристик водосбора. В последние десятилетия количество исследований, где для оценки влияния деятельности человека на сток применяются методы математического моделирования, значительно возросло. Применяются модели разного уровня сложности и обоснованности, начиная от чисто воднобалансовых моделей до развитых физико-математических моделей с распределенными параметрами.

В качестве примера исследования с помощью моделирования возможных изменений речного стока в результате деятельности человека на речном водосборе рассмотрим влияние на сток изменение лесистости. В ряде работ, выполненных в СССР на основе сравнения стока с речных бассейнов с разной лесистостью, преобладает вывод о том, что вырубка лесов в условиях Европейской части ведет к уменьшению годового стока. Этому противоречат детальные воднобалансовые исследования, проведенные рядом наших ученых и в первую очередь И.О.Крестовским (Крестовский, 1986), которые показали, что и в условиях России лес уменьшает годовой сток, но это уменьшение зависит от возраста леса, и только густые старые леса с небольшим испарением могут приводить к увеличению стока. Анализ этих

результатов был проведен помощью физико-математической модели, построенной по данным экспериментальных наблюдений на водосборе лога Таежный Валдайской воднобалансовой станции, на котором растет старый еловый лес (Кучмент и др., 2012). Модель включала описание процессов перехвата жидких и твердых осадков кронами деревьев, накопления и таяния снежного покрова, вертикального переноса влаги в почве и суммарного испарения, поверхностного, подповерхностного и руслового стока. Эта модель была использована для исследования изменения гидрологического цикла лесного водосбора в зависимости от листового индекса (LAI), который характеризует возраст лесного древостоя. Проведенные численные эксперименты показали, что для условий лога Таежный транспирация средневозрастного древостоя превышает транспирацию молодняка на 32-35% и старого древостоя на 6-18%. Вследствие задержания выпавшего снега кронами деревьев и его последующего испарения в течение зимы максимальные снегозапасы перед началом весеннего половодья при максимальной величине LAI снижаются на 30%. Для оценки возможных изменений гидрологического цикла при полной вырубке леса значения изменяющихся при вырубке леса почвенных характеристик лога Таежный заменялись по данным соответствующих измерений на соседнем безлесном (полевом) водосборе лога Усадьевский. Максимальные расходы весеннего половодья после вырубки леса выросли в среднем на 50%. В тоже время годовой сток после вырубки леса увеличился незначительно (на 7-10%), что подтверждает выводы И.О.Крестовского.

Ансамблевые гидрологические прогнозы

В последние годы заметно активизировались исследования по качественному изменению парадигмы гидрологического прогнозирования – детерминистические (однозначные) прогнозы заменяются прогнозами возможных ансамблей прогнозируемой величины или соответствующих им вероятностных распределений. Стимулом этих исследований послужило развитие ансамблевых методов прогноза погоды, которое последовало за созданием суперкомпьютеров и способствовало значительному улучшению качества этих прогнозов. Исследования возможностей использования ансамблевых прогнозов погоды для гидрологического прогнозирования привело к созданию методов ансамблевых гидрологических прогнозов. В то же время оказалось, что пути повышения качества гидрологических прогнозов и учета неопределенности, заключенные в ансамблевом прогнозировании, могут быть продуктивными и для случаев, где прогнозы погоды не используются.

Детерминистический гидрологический прогноз позволяет определять лишь математическое ожидание прогнозируемой величины, игнорируя информацию о ее менее вероятных значениях. Однако для выбора оптимальных решений при управлении водными ресурсами эта информация и оценка ее надежности могут иметь критическое значение для потребителей. Особое значение имеет предсказание вероятности редких катастрофических явлений. С этой точки зрения, при разработке методов гидрологических прогнозов желательно обеспечить успешность прогнозирования не только математического ожидания, но и различных квантилей прогнозируемых величин. Представление гидрологических прогнозов в виде ансамблей прогнозируемых величин или их вероятностных распределений при соответствующем выборе критериев качества прогнозов позволяет решать эту задачу путем привлечения дополнительной информации об источниках неопределенности и выбора оптимального интервала прогнозирования. Появились работы, где на примере конкретных водноресурсных систем показано, что использование ансамблевых прогнозов стока обеспечивает большую экономическую эффективность, чем детерминистические прогнозы (Boucher et al., 2011).

Исследования по разработке методов краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов и определении их возможной заблаговременности проводились в многочисленных гидрологических прогностических центрах (Cloke, Pappenberger, 2009). Преимущества и ограничения различных методов учета и уменьшения неопределенности краткосрочных гидрологических прогнозов, обусловленных недостаточной точностью входной информацией, а также неадекватностью структуры гидрологических моделей и ошибками в их параметрах, сопоставлялись в рамках инициированного ВМО международного проекта HEPEx (Hydrological Ensemble Prediction Experiment).

Методика ансамблевого прогнозирования оказалась эффективной и для долгосрочных прогнозов речного стока (заблаговременностью от нескольких недель до нескольких месяцев). В ИВП РАН проведены исследования возможностей повышения качества долгосрочных прогнозов весеннего стока с помощью физико-математических моделей формирования стока с распределенными параметрами, включающих описание вертикального переноса тепла и влаги в системе снег-почва в зимний и осенний период (Кучмент, Гельфан, 2007; 2009). Эти исследования показали, что использование таких моделей существенно улучшает точность и надежность детерминистических расчетов весеннего стока по сравнению с расчетами на основе регрессионных связей. Долгосрочные метеорологические прогнозы с заблаговременностью 2-3 месяца не выпускаются, однако в

большинстве случаев объем весеннего стока определяется начальными условиями перед снеготаянием. Неопределенность, которую вносит отсутствие метеорологических данных за период заблаговременности прогноза, может быть оценена путем использования ансамблей погод, наблюдавшихся в предшествующие годы за период заблаговременности прогноза (как это делается в оперативной практике США), или случайных ансамблей погод, построенных с помощью генераторов погоды по этим наблюдениям. По ансамблям возможных погод с помощью моделей формирования стока можно получить ансамбли прогнозируемых гидрографов стока и по ним находить не только наиболее вероятные прогнозируемые характеристики стока, которые определяются при детерминистическом прогнозе, но и строить вероятностные распределения прогнозируемых объёмов талого стока и максимальных расходов для оценки неопределенности прогноза. Применение физико-математических моделей формирования стока с распределенными параметрами создает возможность, помимо учета неопределенности в задании метеорологических условий за период заблаговременности прогноза, также оценивать неопределенность прогнозов, обусловленную различным пространственным распределением метеорологических величин и использованием разных предикторов и начальных условий. Преимущества применения физико-математических моделей формирования стока с распределенными параметрами для долгосрочных прогнозов характеристик весеннего половодья, а также использования идей ансамблевого прогнозирования для повышения эффективности этих прогнозов показаны в наших работах (Кучмент, Гельфан, 2007; 2009) на примере рек Вятка, Сосна и Сейм.

Моделирование формирования качества воды на водосборе.

В последнее десятилетие совершенствование моделирования качества воды связано, прежде всего, с использованием средств технического прогресса: вычислительной техники, автоматизированных контактных и дистанционных измерительных устройств, ГИС-технологий и т.п. Разнообразен и используемый математический аппарат: от простых эмпирических и полуэмпирических формул, применяющихся для расчета стока и выноса примесей с неизученных и малоизученных водосборов, до дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы тепло- и массопереноса и требующих специального информационного обеспечения, а также привлечения достаточно мощной вычислительной техники.

Примером относительно простой модели, ориентированной на решение задачи оценки биогенной нагрузки на малые озера Финляндии, может служить совместная разработка специалистов России и Финляндии (Кондратьев и др., 2003). Основными объектами совместного исследования являлись водосборы притоков оз.Пааярви, на котором

расположена биологическая станция Университета г.Хельсинки. Вынос фосфора в значительной степени определяется стоком с сельскохозяйственных полей, максимальные концентрации органического вещества характерны для стока с лесных и болотных участков. Исследуемые водосборы представлялись в виде однородной имитирующей емкости, русловая трансформация воды и примесей не выделялась в виде отдельного блока. Для описания гидрологических процессов использована модель *ILHM* (Institute of Limnology Hydrological Model) Для расчетов выноса общего фосфора и органического вещества применялись эмпирические зависимости, связывающие концентрации общего фосфора и органического вещества в замыкающем створе с расходом воды и процентом сельскохозяйственных территорий, лесов и болот. Результаты расчетов позволили выявить основную тенденцию возможного изменения выноса растворенных примесей: возрастание доли полевых площадей на водосборе и соответствующее снижение залесенных площадей приводят к снижению выноса органического вещества и возрастанию выноса фосфора.

В конце 90-х годов в Институте озераведения РАН выполнялись исследования миграции растворенных тяжелых металлов (ТМ) в озерно-речной сети на примере водосбора Лахтинского Разлива, находящегося в пределах Санкт-Петербурга. Система включает 4 проточных водоема и несколько водотоков. Основное внимание здесь уделено массообмену между водой и донными отложениями, процессам сорбции и десорбции ТМ наносами, а также комплексообразованию между растворенным ОВ и ТМ. Даже без учета консервативности примеси модель требует задания более 40 параметров. Разработка послужила хорошей основой для выполнения имитационных расчетов, направленных на углубление понимания механизмов формирования загрязнения водных объектов. Однако в полной мере обеспечить модель значениями входных параметров, основанных на данных натурных наблюдений, так и не удалось. Приведенный пример иллюстрирует характерную ситуацию с моделированием качества воды, когда есть понимание происходящих процессов и можно их описать математически, но с обоснованным заданием значений многочисленных параметров возникают серьезные затруднения. В результате модель остается чисто исследовательской.

До стадии практического применения на объектах Северо-Запада России к настоящему моменту доведена модель *ILLM* (Institute of Limnology Load Model), разработанная в Институте озераведения РАН (Кондратьев и др., 2011) и предназначенная для расчета внешней нагрузки общим азотом и общим фосфором на водные объекты со стороны водосбора. Модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных

объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах в северо-западном регионе России. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью, а также принимает во внимание массообмен с атмосферой. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих. Шаг расчетов составляет 1 год, что объясняется именно такой дискретностью исходной информации по основным источникам биогенной нагрузки и требованиями ХЕЛКОМ к снижению среднегодовых значений нагрузки на Балтику. Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных на Российской части водосбора Финского залива (водосборы рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Тосна, Славянка).

Литература

1. Кондратьев С.А. Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора / Водные ресурсы. 2011. Т.38. №1. С.56-64.
2. Кондратьев С.А., Арвола Л., Хакала И., Алябина Г.А., Маркова Е.Г. 2003. Оценка стока воды, выноса фосфора и органического вещества с малых водосборов Северо-Запада России и Финляндии (по данным математического моделирования). - Известия Русского Географического Общества, т.135. Вып.6. с. 29-36.
3. Крестовский О.И. Влияние вырубки леса и восстановления лесов на водность рек. Гидрометеиздат, Л. 1986. 117с.
4. Кучмент Л. С., Гельфан А. Н. 2010. Совместное использование детерминистического и вероятностного подходов к расчетам характеристик максимального стока. Метеорология и гидрология, №6, 74-86.
5. Кучмент Л. С., Гельфан А. Н. 2009. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока, Метеорология и гидрология, №3, с. 54-67.
6. Кучмент Л. С., Гельфан А. Н. 2007. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока, Метеорология и гидрология, №2, с. 83-95.
7. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. 2012. Модель гидрологического цикла лесного водосбора и оценка изменений водного баланса после вырубки леса. Лесоведение, №5.

- 8 Кучмент Л.С., Гельфан, Демидов В.Н. 2010. Пространственная модель формирования талодождевого стока горной реки (на примере Верхней Кубани), Метеорология и гидрология.. № 12,с.76-88.
9. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. 2008. Оценка возможных масштабов и риска катастрофических наводнений на основе физико-математических моделей формирования стока. Колл. монография «Опасные природные явления на поверхности суши: механизмы и катастрофические следствия» Отв. Редактор В.М. Котляков. Москва, изд-во ИГ РАН. С. 124-147.
10. Кучмент Л.С., **Кучмент Л.С.**, Гельфан А.Н., Демидов В.Н. 2002. Расчет вероятностных характеристик максимального стока по метеорологическим данным с использованием динамико-стохастических моделей формирования стока. Метеорология и гидрология, № 5, 83-94.
11. Bartholmes J. C., J. Thielen, M. H. Ramos, and S. Gentilini. 2009. The European Flood Alert System EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 141–153.
12. Boucher M.-A., F. Anctil, L. Perreault, and D. Tremblay. 2011 A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context. *Adv. Geosci.*, 29, 85-94, doi:10.5194/adgeo-29-85-2011.
13. Cloke, H.L., Pappenberger, F. 2009. Ensemble flood forecasting: A review. *J. Hydrology*. 375, 613-626 doi:10.1016/j.jhydrol.
14. Reed S, Koren V, Smith MB, Zhang Z, Moreda F, Seo DJ, and DMIP Participants. 2004. Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology* 298: 27–60.