

В.А. Кузьмин, А.А. Полякова, С.В. Ерёмкина, И.С. Гаврилов, Н.А. Рошет

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА МАЛОИЗУЧЕННЫХ И
НЕИЗУЧЕННЫХ ВОДОСБОРАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

V.A. Kuzmin, A.A. Polyakova, S.V. Eryomina, I.S. Gavrilov, N.A. Roshet

**AUTOMATED FORECASTING HAZARDOUS HYDROLOGICAL EVENTS
IN UNGAUGED AND POORLY GAUGED BASINS OF THE RUSSIAN
FEDERATION**

Рассмотрены основные принципы и контент новой технология автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации.

Ключевые слова: специализированное гидрометеорологическое обеспечение, гидрологическая модель, гидрологические прогнозы, малоизученные и неизученные водосборы, данные дистанционного зондирования.

Basic principles and content of a novel technology of the automated forecasting of hazardous hydrological phenomena in ungauged and poorly gauged basins of the Russian Federation is considered.

Keywords: customer-oriented hydrometeorological support, hydrological model, hydrological forecasts, poorly gauged and ungauged basins, remote sensing data.

Согласно правоустанавливающим документам Росгидромета [1-2], разработка методов и технологий прогнозирования опасных гидрологических явлений и современных методов снижения ущерба от них с переходом от стратегии индивидуальной защиты объектов к комплексной системе мер их защиты от негативного воздействия таких явлений входит в область ответственности службы. Опасные гидрологические процессы и явления могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций природного характера, способных повлечь человеческие жертвы, нанести вред здоровью людей или окружающей природной среде, вызвать значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [3-13].

В условиях изменяющегося климата, сокращения сети станций гидрометеорологического мониторинга, нарушения однородности рядов наблюдений из-за значительной антропогенной нагрузки на отдельные речные водосборы, расчеты и прогнозирование речного стока с использованием существующих традиционных методов становятся малоэффективными [14-20].

К сожалению, методы и технологии гидрологического прогнозирования в Российской Федерации значительно уступают методам и технологиям, применяемым национальными гидрометеорологическими службами Японии, США, Канады, Австралии, стран Европейского Союза и даже отдельных развивающихся стран. Согласно оценкам Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) при ООН [14-16, 18,

19], Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) отличается низшим уровнем экономической эффективности: отсутствие в Росгидромете каких-либо планов устойчивого экономического развития, а также морально устаревшие прогностические методы и оборудование не позволяют развивать технологии специализированного гидрометеорологического обеспечения конкретных потребителей гидрометеорологической информации. Практически единственным информационным продуктом являются данные наземных наблюдений, доходы от продажи которых лишь в мизерной степени дополняют средства, получаемые из государственного бюджета [18].

В названных выше странах ситуация отличается радикальным образом: данные наблюдений обычно находятся в свободном доступе, а производимая национальными гидрометеорологическими службами гидрометеорологическая продукция ориентирована на конечного потребителя. Кроме того, более высокий уровень общественного самосознания позволяет поддерживать волонтерские сети гидрометеорологических наблюдений. Так, например, пространственная дискретность и эффективность волонтерской сети в штате Колорадо не уступают сети Национальной Службы Погоды США!

Прогностическая деятельность, осуществляемая Национальной Службой Погоды США, Австралийским Бюро Метеорологии и другими национальными агентствами, имеет под собой мощную технологическую базу: в частности, в этих странах хорошо развиты группировки метеорологических и геофизических спутников и сети метеорологических радаров; большинство гидрометеорологических наблюдений выполняется автоматически; задержки в получении данных прогностическими подразделениями незначительны; для выпуска гидрологических и метеорологических прогнозов задействованы значительные вычислительные и информационные ресурсы [20]. В результате повышаются социальная значимость и экономическая эффективность гидрометеорологической деятельности.

Опасные гидрологические процессы в явления в развитых (в гидрометеорологическом отношении) странах обычно прогнозируются в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Типовая прогностическая процедура, как правило, включает следующие элементы:

- автоматическое получение данных наземных, радарных и спутниковых наблюдений, а также выходных данных численных моделей погоды;
- автоматическая обработка данных, их усвоение и архивирование;
- предварительная калибровка и валидация прогностической модели;
- запуск модели – выпуск и автоматическая рассылка прогнозов, а при необходимости – формирование и распространение оповещений о повышении гидрологического или метеорологического риска.

Подобной структурой будет обладать и технология, разрабатываемая в рамках НИР «Водосбор» (тема «Автоматизированное прогнозирование опасных гидрологических процессов и явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации»), однако её контент будет полностью адаптирован к условиям РФ. Практическое внедрение этой технологии позволит ликвидировать отставание нашей страны в данной области от развитых (в гидрометеорологическом отношении) стран. К сожалению, техническая оснащённость и технологический уровень региональных

управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) Росгидромета соответствуют 50-70 годам прошлого века. Поэтому прогностическая продукция не отличается разнообразием, ни качеством, ни ориентированностью на конкретного потребителя.

Главной целью выполняемых исследований является создание комплекса расчётных и технологических процедур, которые могут быть использованы в полностью автоматизированном режиме вне зависимости от степени гидрометеорологической изученности водосбора. Приведём ключевые принципы разрабатываемой технологии:

- прогнозирование выполняется по двухуровневому принципу: сначала осуществляется автоматическое фоновое прогнозирование стока для сравнительно крупных территорий, целью которого является выявление водосборов с повышенным уровнем риска формирования опасного гидрологического процесса или явления, а затем — уточнённое прогнозирование стока (при необходимости может быть привлечён гидролог-прогнозист) только для тех водосборов, на которых обнаружено повышение уровня риска. Этот подход позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные, информационные и кадровые ресурсы;
- массивы исходных данных для гидрологической модели формируются путём интегрирования разнородных данных (спутниковых наблюдений, выходных данных численных моделей погоды и имеющихся наземных наблюдений) [3-13];
- получение данных, контроль и анализ их качества, обработка, ассимиляция и архивирование выполняются в полностью автоматизированном режиме, что позволяет эффективно использовать имеющиеся вычислительные, информационные и кадровые ресурсы [9];
- в качестве гидрологической модели будет использована усовершенствованная версия разработанной в РГГМУ модели Multi-Layer Conceptual Model (MLCM), которая может быть использована как для интерактивного, так и для полностью автоматизированного прогнозирования стока (было экспериментально установлено, что эта модель обладает большей прогностической эффективностью, чем американская модель «Сакраменто») [17, 20];
- калибровка и валидация модели MLCM выполняются в полностью автоматизированном режиме [3-13];
- разрабатываемая технология является «облачной» (все её компоненты хранятся и используются на вычислительных мощностях РГГМУ; авторизованный пользователь может использовать эту технологию или её отдельные элементы через сеть Интернет);
- все функциональные элементы разрабатываемой технологии могут быть использованы как самостоятельные технологии;
- разрабатываемая технология может быть использована в качестве основы для создания национальных или региональных противопаводковых систем;
- конечным продуктом разрабатываемой технологии является автоматически формируемое оповещение об опасном гидрологическом явлении (ОГЯ), полностью готовое для отправки потребителю, например, по электронной почте или в виде СМС (разработка технических средств передачи оповещений или системы диссеминации прогностической информации техническим заданием и календарным

планом не предусмотрена). В качестве альтернативы также может быть рассмотрена возможность рассылки пользователям рекомендуемых управленческих решений, направленных на снижение ущерба от ОГЯ.

Реализация этих принципов позволит создать надёжную и эффективную прогностическую технологию мирового уровня, в настоящее время в нашей стране аналогов не имеющую. При этом предполагается, что данная технология будет обладать значительным потенциалом для дальнейшего совершенствования и коммерциализации. В частности, она может быть легко дополнена опцией вероятностного (в частности, ансамблевого) прогнозирования, состыкована с системой автоматизированной поддержки принятия решений на основе прогностической информации, интегрирована в более крупные прогностические системы [3-13].

Основными элементами разрабатываемой технологии являются:

- блок получения и первичной обработки данных (с программным обеспечением, предназначенным для анализа и контроля качества поступающих данных и их первичной обработки);
- база данных (с программным обеспечением, предназначенным для архивирования данных в оригинальном и исправленном виде, а также документирования и протоколирования всех выполняемых процедур). Для этой цели будет использована база данных аппаратно-программного комплекса «INWADA», разработанная в рамках АВЦП Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2013 годы)», № 2.1.1/9901 «Автоматизированная система краткосрочного прогнозирования паводков и половодий»;
- блок расчётов и прогнозирования (включает процедуры количественного и качественного оценивания степени гидрологической изученности речного водосбора, модель для фоновых и уточнённых прогнозирования дождевых паводков и сезонных половодий на неизученных и малоизученных водосборах, а также инструментарий для калибровки и валидации модели).

Блок получения и первичной обработки данных ориентирован на полностью автоматизированное использование следующих видов данных:

- спутниковые данные, использование которых позволяет значительно повысить эффективность прогнозирования паводков на малоизученных и неизученных водосборах. В настоящее время происходит постепенное восстановление группировки метеорологических спутников Российской Федерации, утраченных в последнем десятилетии прошлого века. Поэтому для разработки технологии комплексного использования разнородных данных, авторы преимущественно используют данные NASA из открытых источников, поступающие в РГГМУ, в частности, через Лабораторию Спутниковой Океанологии. Наибольший интерес с точки зрения прогнозирования паводков представляют данные о влажности верхнего слоя почвы (до 2-5 см от поверхности), позволяющие корректировать начальные условия при моделировании стока;
- радарные данные позволяют значительно повысить пространственно-временную дискретность наблюдений за осадками и сделать её достаточной для моделирования и прогнозирования катастрофических дождевых паводков при помощи концептуальных гидрологических моделей с распределёнными параметрами. Для этой

- цели в РГГМУ был установлен современный доплеровский метеорадар МЕТЕОР DX50, позволяющий получать необходимые данные с шагом в несколько минут и избыточной (с точки зрения гидрологического прогнозирования) дискретностью;
- данные наземных наблюдений, выполняемых сетью Росгидромета, к сожалению, пока не обладают ни достаточной для прогнозирования паводков пространственно-временной дискретностью, ни возможностью получения в режиме реального времени;
 - выходные данные мезомасштабных моделей погоды являются важнейшим элементом фонового прогнозирования стока. В частности, их использование позволяет повысить заблаговременность фоновых прогнозов стока на 3–5 суток. В РГГМУ для этой цели используется модель WRF (Weather Research and Forecasting Model). Обработка поступающих данных включает идентификацию пропусков и недопустимых символов, заполнение пропусков в соответствии с рекомендациями ВМО, ассимиляцию данных и формирование единых массивов данных об осадках и испарении, которые затем поступают на вход новой гидрологической модели MLCM, описанной в следующем разделе. Все внесённые изменения автоматически документируются и протоколируются [18]. Архивирование данных также выполняется в соответствии с рекомендациями ВМО [18], т.е. в оригинальном и обработанном виде. Кроме того, выполняется автоматическое архивирование данных об осадках и стоке, находящихся в открытом доступе на веб-сайтах зарубежных гидрометслужб, что позволяет выполнять исследования в области моделирования стока (включая паводки) в режиме, близком к реальному времени (с задержкой не более 3 ч).

Наличие динамической базы данных (БД) является обязательным условием эффективного функционирования систем автоматизированного прогнозирования как «обычного» стока, так и опасных гидрологических процессов и явлений. Именно сюда поступают данные из различных источников, здесь они обрабатываются и архивируются и отсюда считываются прогностической моделью. Последняя версия базы данных аппаратно-программного комплекса «INWADA» (10.2012), изначально предназначенная для информационного обеспечения автоматизированной системы краткосрочного прогнозирования паводков и половодий (разработанной в рамках АВЦП Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2013 годы)», № 2.1.1/9901) была модифицирована: в частности, было разработано программное обеспечение, предназначенное для получения и обработки спутниковых данных, поступающих из Лаборатории спутниковой океанологии РГГМУ. Кроме того, было разработано программное обеспечение, предназначенное для составления единых массивов данных об осадках на основе данных реанализа модели WRF (для малоизученных и неизученных в метеорологическом отношении водосборов).

Для практического использования разрабатываемой технологии автоматизированного прогнозирования опасных гидрологических процессов и явлений на малоизученных и неизученных водосборах Российской Федерации в БД АПК «INWADA» должны автоматически поступать следующие данные:

- об осадках (средние осадки по водосбору и/или осадки, измеренные на дождемерных постах как рассматриваемого, так и соседних водосборов); источники: модель WRF, данные наблюдений на метеостанциях, входящих в сеть международного обмена;

- о стоке (непрерывные 1-часовые, 6-часовые или, в крайнем случае, ежедневные расходы воды, однако последние непригодны для моделирования паводков, формирующихся и развивающихся быстрее 24 ч); источники: сеть наблюдений Росгидромета, отраслевые сети;
- об испарении или испаряемости (ежедневные значения фактическом испарении или данные об испаряемости, полученные из климатических справочников); источники: модель WRF, спутниковые данные.

Данные о морфометрических характеристиках водосбора (площадь водосбора, длина основного русла, средний уклон водотока и средний уклон склонов) в настоящее время заносятся в БД вручную, поскольку в РФ в настоящее время нет баз данных, содержащих такую информацию.

Те данные, которые являются неизменными на протяжении достаточно длинного периода времени (т.е. гораздо большего, чем время развития паводка), например, климатологические данные об испаряемости и данные о морфометрических характеристиках водосбора, обновляются весьма редко, поэтому они также могут быть вручную внесены в статическую базу данных из различных справочников (включая доступные в сети Интернет) и специализированных интернет-сайтов. Однако при выполнении массовых расчетов паводкового стока (например, в масштабе целой страны или отдельного крупного региона) возможно автоматическое считывание информации подобного рода и занесение полученной информации в статическую базу данных.

Описанные процедуры позволяют выполнять фоновое прогнозирование стока с неизученных и малоизученных водосборов в полностью автоматизированном режиме. Результаты численных экспериментов по автоматизированному моделированию и прогнозированию стока при дефиците или низком качестве данных наземных наблюдений будут представлены в последующих публикациях.

Представленные результаты исследований были получены при поддержке Министерства образования и науки РФ (Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг., соглашение №14.В37.21.1267).

Литература

1. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. № 1235-р.
2. ГОСТ Р 22.1.01 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных гидрологических явлений и процессов. Общие требования». Введен 01.01.2000 г.
3. Карлин Л.Н., Кузьмин В.А., Дикинис А.В., Шилов Д.В. Мониторинг и прогнозирование опасных гидрометеорологических явлений на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений. – СПб.: Сборник научных трудов СПбВМИ, 2012, № 2, стр. 17–27.
4. Кузьмин В.А. Алгоритмы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования паводков. // Метеорология и гидрология, 2009, № 7, с. 74–85.
5. Кузьмин В.А., Ванкевич Р.Е., Шеманаев К.В. Оценка влажности водосбора по данным дистанционного зондирования, наземных гидрометрических наблюдений и математического моделирования стока. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 45–57.

6. Кузьмин В.А., Дикинис А.В. Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 16-27.
7. Кузьмин В.А., Заман А. Постобработка и корректировка прогнозов паводков, выпускаемых при помощи автоматизированных систем. // Метеорология и гидрология, 2009, № 8, с. 80-90.
8. Кузьмин В.А., Коротыгина У.Е., Гаврилов И.С., Сурков А.Г., Сергеенко С.Ю. О возможности повышения заблаговременности прогнозов стока средних рек путем стыковки гидродинамических моделей погоды и гидрологических моделей. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 16, с.22-27.
9. Кузьмин В.А., Коротыгина У.Е., Макин И.С., Сергеенко С.Ю., Румянцев Д.Ю. Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 38-44.
10. Кузьмин В.А. Краткосрочное прогнозирование катастрофических половодий и паводков. // Метеорология и гидрология, 2001, № 6, с. 89-95.
11. Кузьмин В.А. Отбор и параметризация прогностических моделей речного стока. // Метеорология и гидрология, 2001, № 3, с. 85-90.
12. Кузьмин В.А. Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков. // Метеорология и гидрология, 2009, № 6, с. 92-104.
13. Кузьмин В.А., Сурков А.Г., Шеманаев К.В. Принципы автоматической обработки данных в автоматизированных системах прогнозирования стока. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 28-37.
14. Руководство по гидрологическим прогнозам, вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989, с. 245.
15. Руководство по гидрологическим прогнозам, вып. 3. Прогнозы ледовых явлений на реках и водохранилищах. – Л.: Гидрометеиздат, 1989, с. 168.
16. Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 г. (с учетом аспектов изменения климата). Материалы VI Метеорологического съезда. – СПб., 2009. – 77 с.
17. Burnash R.J.C., Ferral R.L., McGuire R.A. A generalized streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers // Joint Federal and State River Forecast Center. US NWS and California DWR. – Technical Report, 1973, Sacramento, CA. – 204 p.
18. Guide to Hydrological Practices, World Meteorological Organization №168, vol. II – Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO, Geneva, 2009. – 302 p.
19. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): The Scientific Basis. – New York: Cambridge University Press, 2001.
20. Kuzmin V.A., Seo D.-J., and Koren V.V. Fast and Efficient Optimization of Hydrologic Model Parameters Using a Priori Estimates and Stepwise Line Search (SLS), J. of Hydrology, vol. 353, 2008.