

*В.А. Кузьмин, Д.В. Соколова, Т.П. Проданов,  
Ю.В. Принцевская, С.В. Еремина, И.С. Гаврилов*

## **ОЦЕНИВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ**

*V.A. Kuzmin, D.V. Sokolova, T.P. Prodanov,  
Y.V. Printsevskaya, I.S. Gavrilov, S.V. Eremina*

## **THE HYDROLOGICAL RISKS ASSESSMENT BASED ON PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS**

*В статье рассмотрен новый метод оценивания вероятностной компоненты гидрологических рисков на основе метода главных компонент, известного в англоязычной литературе как Principal Component Analysis (PCA) или Singular Spectrum Analysis (SSA). Этот метод обладает опцией обнаружения точек разладки (нарушения однородности и/или стационарности рассматриваемого гидрологического процесса) и опцией расчёта значений расходов или уровней воды заданной обеспеченности. Представленный в статье метод является главным функциональным элементом разработанной в РГГМУ автоматизированной системы «Vulnerability Assessment of Civil Engineering Structures» (АС «VACES-HS»), предназначенной для оценивания уязвимости гидротехнических сооружений.*

*Ключевые слова: гидрометеорологическая уязвимость, гидрологические риски, вероятностная компонента риска, изменение климата, переменная антропогенная нагрузка, стационарность процесса, метод главных компонент, точки разладки, обеспеченность.*

*In this paper, a new method to assessing the probabilistic component of hydrological risks is considered. This method is based on Principal Component Analysis (PCA), a.k.a. Singular Spectrum Analysis (SSA). It includes two important options, such as (1) time series disorder detection and (2) computing water stages or discharges of certain exceedance probability. The presented method is implemented in an automated system recently developed in RSHU for Vulnerability Assessment of Civil Engineering Structures (VACES-HS).*

*Key words: hydrometeorological vulnerability, hydrological risks, probabilistic component of risk, climate change, variable human impact, process stability, Principal Component Analysis, disorders, exceedance probability.*

Причина возрастания или изменения гидрометеорологических рисков, связанных с проектированием и эксплуатацией различных гидротехнических сооружений (ГТС) и определяемых изменением климата и переменной антропогенной нагрузкой – методологическая.

Практически все методы определения ОГХ основаны на предположении, что используемые ряды являются однородными и стационарными и направлены на построение кривых обеспеченностей, отражающих вероятность превышения тех или иных значений расходов или уровней воды [1–3]. В условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки такое допущение нельзя считать обоснованным. Это означает, что реальная повторяемость катастрофического

паводка, учтённая при проектировании и строительстве ГЭС, составляет, например, не 1 раз в 100 лет, а 1 раз в 10–15 лет, поэтому плотина ГЭС или любое другое ГТС подвержены повышенному риску частичного повреждения или даже полного разрушения.

В 2013 г. в РГТМУ была разработана специальная многокомпонентная технология мониторинга, расчёта и прогнозирования гидрометеорологической уязвимости гидротехнических сооружений в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки [4], учитывающая мировые тренды в области математического моделирования гидрометеорологических процессов, перспективные разработки, выполненные специалистами РГТМУ и других ведущих российских исследовательских организаций, а также рекомендации Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [5–14]. Эта технология реализована при помощи автоматизированной системы «VACES-HS» (от англ. «Vulnerability Assessment of Civil Engineering Structures», шифр HS идентифицирует назначение АС: Н – hydraulic (гидротехнический); S – small (малый)), предназначенной для мониторинга и оценивания гидрометеорологической уязвимости ГТС в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки и новых методов расчёта основных гидрологических характеристик, используемых при проектировании малых ГЭС [6].

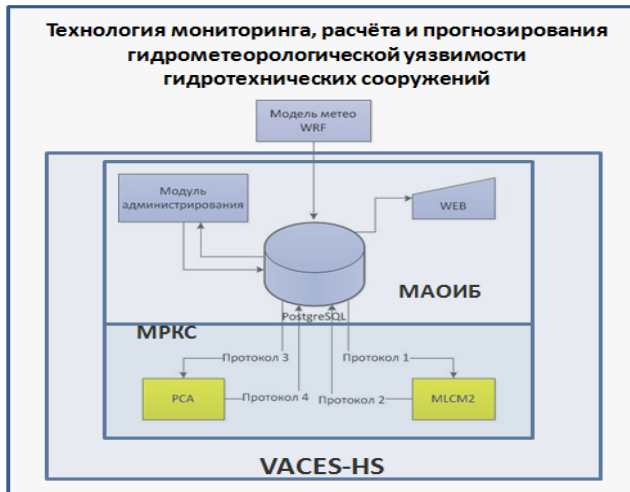


Рис. 1. Структурная схема разработанной многокомпонентной технологии мониторинга, расчёта и прогнозирования гидрометеорологической уязвимости гидротехнических сооружений в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки и её ключевых элементов – АС «VACES-HS» с модулями МАОИБ и МРКС

Как показано на рис. 1, АС «VACES-HS» состоит из нескольких функциональных элементов: инструментария использования и управления данной АС через сеть Интернет или локальные сети, внешнего блока получения и обработки выходных данных синоптической модели WRF, базы данных (БД), модуля

администрирования и обеспечения информационной безопасности (МАОИБ) и модуля расчётов, контроля и статистики (МКРС). Блок МАОИБ является исключительно средством информационного обеспечения и управления блока МКРС, который включает два ключевых элемента:

- вновь разработанный метод специализированного гидрометеорологического обеспечения малой гидроэнергетики, оценивания гидрометеорологической уязвимости объектов малой гидроэнергетики в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки, включающий инструментарий для прогнозирования стока малых и средних водотоков, используемых для производства электроэнергии, и

- вновь разработанный метод расчёта основных гидрологических характеристик, используемых при проектировании малых ГЭС, с учётом изменения климата и переменной антропогенной нагрузки на речные водосборы.

Модуль МКРС, в свою очередь, состоит из двух основных функциональных элементов (рис. 2). Первый элемент предназначен для мониторинга и долгосрочного оценивания вероятностной компоненты гидрологических рисков на основе метода главных компонент, известного в англоязычной литературе как Principal Component Analysis (PCA) или Singular Spectrum Analysis (SSA). Он обладает двумя ключевыми опциями: опцией обнаружения точек разладки и опцией расчёта значений расходов или уровней воды заданной обеспеченности. На рисунке 1 этот элемент обозначен как «РСА».

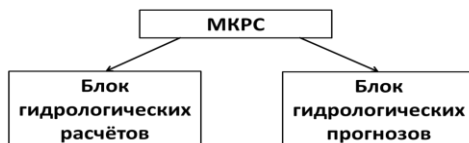


Рис. 2. Основные функциональные элементы блока МКРС

В АС «VACES-HS» расчёты выполняются в соответствии со следующим алгоритмом:

1) Пользователь выбирает, с какой основной гидрологической характеристикой он будет работать. У него есть базовых шесть вариантов:

Переменная	Минимальные	Средние	Максимальные
Расходы воды, м <sup>3</sup> /с	Q_min	Q_ave	Q_max
Уровни воды, см	H_min	H_ave	H_max

Кроме этого, пользователь может выбрать любой другой ряд гидрометеорологических наблюдений, например, данные о среднемесячных осадках. Это может быть исключительно полезно для оценивания метеорологических и климатических факторов изменения гидрологических рисков [13].

2) Выбираются параметры расчёта, необходимые для решения конкретной расчётной задачи, например, «Максимальные» + «Расходы воды» + «07812699» (код водосбора).

- 3) Запускается программа расчёта (в рамках блока «РСА»), которая:
- рассчитывает для ряда критерии Стьюдента и Фишера и выдаёт заключение о его однородности и стационарности (или неоднородности и нестационарности);
  - выполняет расчёт первого начального, второго центрального и третьего центрального моментов для всего ряда, которые поступают в базу данных (БД);
  - рассчитывает, например, расходы заданных обеспеченностей;
  - выполняет обнаружение точек разладки;
  - выполняет анализ устойчивости статистик для выделенных интервалов и выполняется оценивание моментов для неоднородного и нестационарного ряда, на основании которых выполняет расчёт расходов заданных обеспеченностей;
  - выполняет построение двух графиков: один соответствует обычному, общепринятому способу расчёта расходов воды заданных обеспеченностей, другой – способу определения расходов заданных обеспеченностей в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки на речные водосборы;
  - определяет разность значений расходов для одних и тех же обеспеченностей, которая с этого момента начинает называться «гидрометеорологической уязвимостью гидротехнического сооружения» (если первый график расположен ниже второго, то генерируется оповещение: изменение климата привело к росту уязвимости; если наоборот, то уязвимость снизилась) [7].

Автоматизация определения основных гидрологических характеристик достигается путем формализации всех шагов выполнения расчёта (в отличие от методов, рекомендуемых действующим Сводом Правил «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», СП 33-101-2003, предполагающих выполнение экстраполяции расходов или уровней малой обеспеченности вручную), что позволяет реализовать предлагаемый подход в виде компьютерной программы и избавиться от субъективизма ныне применяемого подхода [1–3].

Таким образом, разработанный способ определения основных гидрологических характеристик для неоднородных и нестационарных рядов наблюдений за речным стоком заключается в загрузке данных наблюдений за расходом или уровнем воды из базы данных или отдельного файла, определении точек разладки (то есть точек нарушения однородности и/или стационарности) методом главных компонент [9]. Обнаружение точки разладки выполняется на основе метода главных компонент, при реализации которого выполняется декомпозиция исходного временного ряда на некоторое число главных компонент, анализ их стохастических свойств и, наконец, восстановление временного ряда по выбранным (обычно наиболее информативным) компонентам. Далее выполняется определение трёх младших моментов (первого начального, второго центрального и третьего центрального) для каждого участка между точками разладки. Расчёт трёх младших моментов (первого начального, второго центрального и третьего центрального) осуществляется по общеизвестным и широко используемым формулам для моментов, представленным в справочниках по статистике и

вероятностным расчётам. На следующем этапе производится определение статистических параметров изменчивости моментов (наименьшее и наибольшее значения указанных моментов, их диапазон и среднее квадратическое отклонение) всех интервалов временного ряда между его началом, точкам разладок и концом. После этого определяются стохастические характеристик временного ряда: для характеристик минимального стока – параметры (моменты) распределения вероятности минимальных расходов или уровней, для максимального – параметры (моменты) распределения вероятности максимальных расходов или уровней; кроме того, определяется средняя длина интервала между точками разладки, иллюстрирующая среднее время стабилизации гидрологического процесса. Далее осуществляется расчёт расходов и/или уровней воды заданных обеспеченностей (вероятностей превышения) для неоднородных и/или нестационарных временных рядов гидрометрических наблюдений, характерных для условий изменения климата и переменной антропогенной нагрузки на водосбор рассматриваемой реки [8].

Значения расходов воды малой обеспеченности широко используются при проектировании инженерных гидротехнических сооружений и любых инженерных объектов, находящихся вблизи от водоёмов или водотоков. В рамках предлагаемого подхода расчёт обеспеченностей осуществляется на основе результатов расчёта указанных выше моментов (первого начального, второго центрального и третьего центрального) и выбранного пользователем теоретического распределения вероятности (например, трёхпараметрического гамма-распределения). Выбор теоретического распределения в общем случае зависит от специфики конкретной инженерной задачи; он может осуществляться методом наибольшего правдоподобия, методом наименьших квадратов и т.д., в зависимости от рекомендаций нормативной литературы, регламентирующей расчёт основных гидрологических характеристик для проектирования определённой категории инженерных сооружений [10]. На рис. 3 принципиальная схема реализации разработанного способа в АС «VACES-HS», а на рис. 4 – пользовательский интерфейс блока расчётов МКРС [14].

Краткосрочное прогнозирование стока выполняется следующим образом:

- 1) Протокол 1 (см. рис. 1) считывает данные об осадках, испарении и фактическом стоке.
- 2) Запускается модель MLCM2, рассчитывает расходы.
- 3) Эти расходы сравниваются с расходами заданных обеспеченностей, определёнными выше; определяется их обеспеченность.
- 4) Если обеспеченность меньше предопределённого порогового значения (например, 10%), выдаётся предупреждение.

На рис. 5 и 6 показан пользовательский интерфейс блока гидрологических прогнозов МКРС АС «VACES-HS»: на рис. 5 – вкладка загрузки данных и настройки программы пользовательского интерфейса блока гидрологических, а на рис. 6 – вкладка калибровки и настройки гидрологической модели MLCM2.

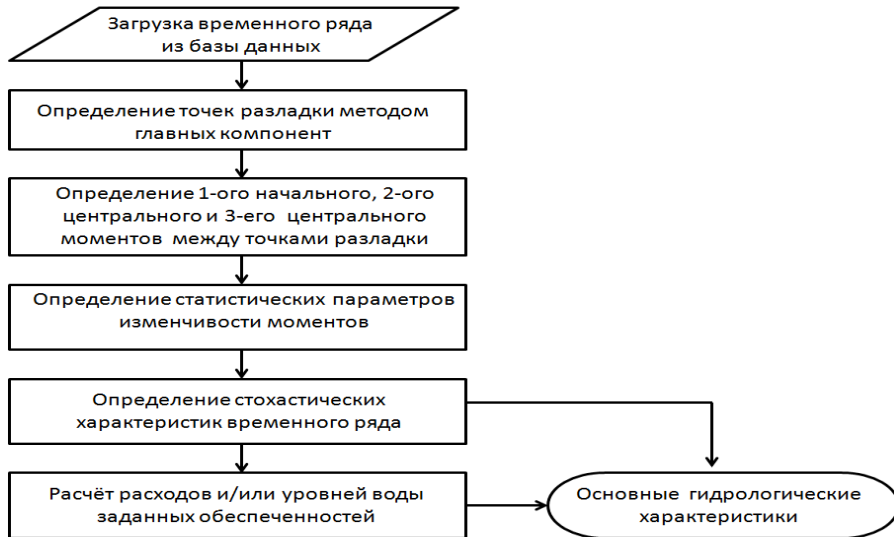


Рис. 3. Принципиальная схема разработанного способа определения расходов или уровней воды заданной обеспеченности, реализованного в АС «VACES-HS»

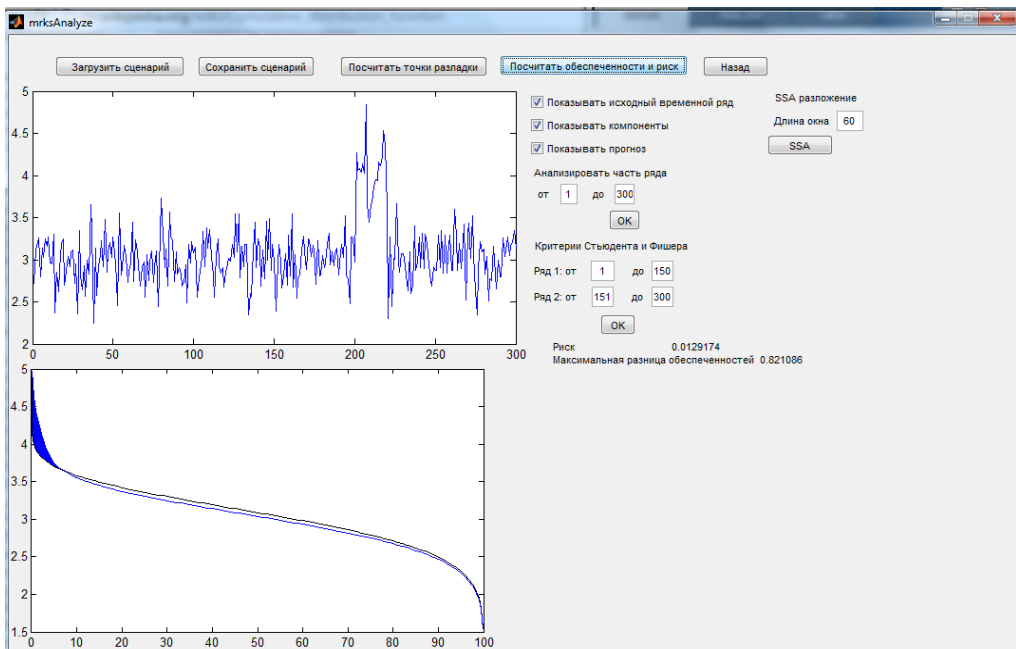


Рис. 4. Пользовательский интерфейс блока гидрологических расчётов МКРС АС «VACES-HS»

Разработанные методы позволяют повысить эффективность использования водных ресурсов и гидрометеорологическую безопасность гидротехнических сооружений гидроэнергетического профиля [12].

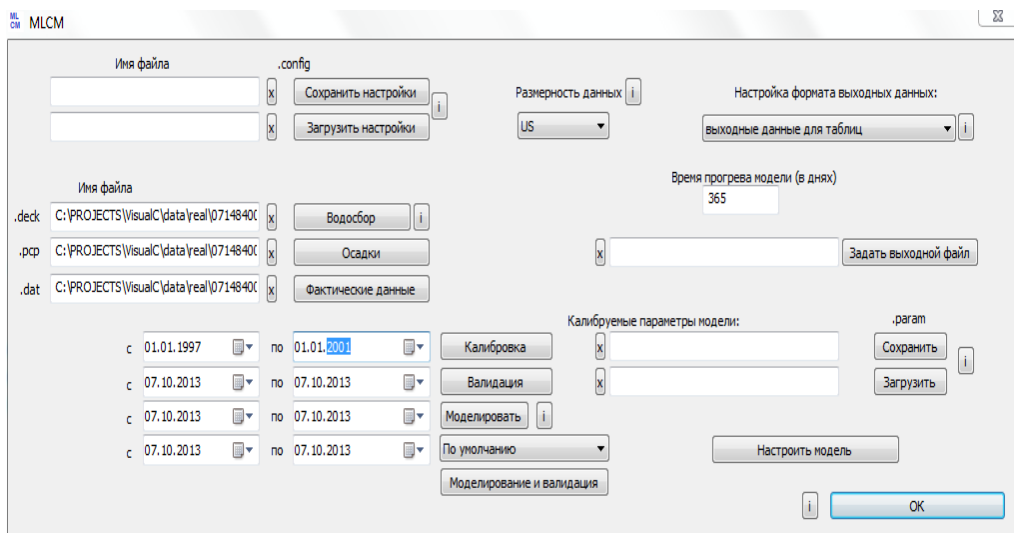


Рис. 5. Пользовательский интерфейс блока гидрологических прогнозов МКРС АС «VACES-HS»: вкладка загрузки данных и настройки программы.

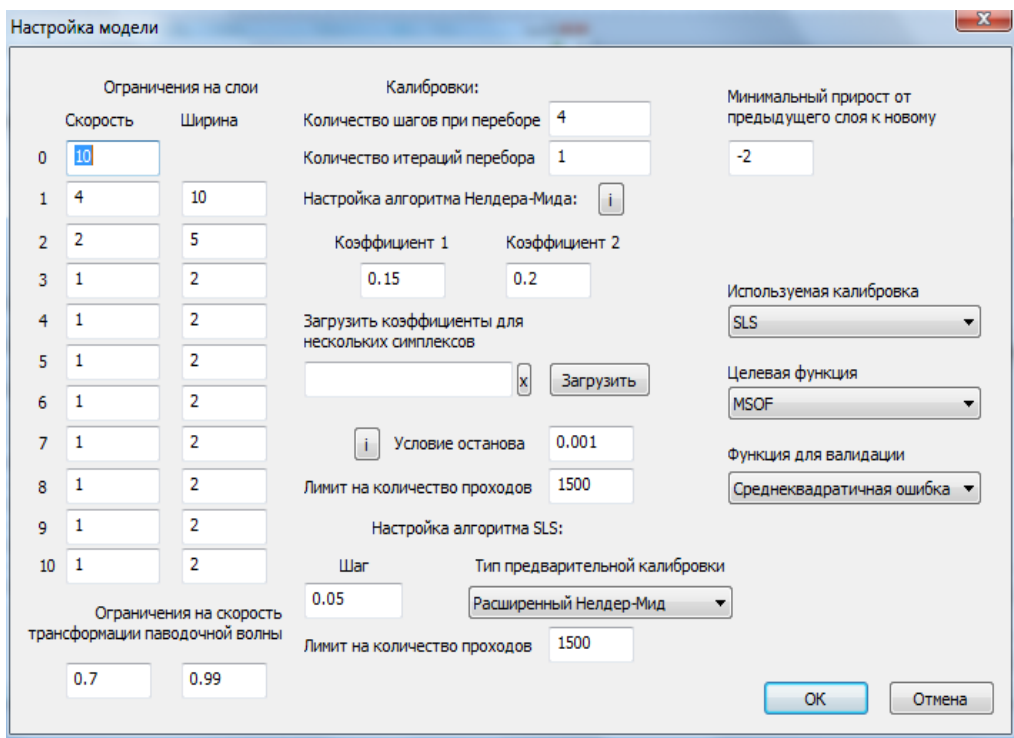


Рис. 6. Пользовательский интерфейс блока гидрологических прогнозов МКРС АС «VACES-HS»: вкладка калибровки и настройки гидрологической модели MLCM2

Модуль МКРС может быть использован для углубленного статистического анализа любых рядов наблюдений, а не только гидрологических. Кроме того, МКРС может быть легко усовершенствован и адаптирован для обеспечения автоматизированной поддержки принятия управленческих решений. Для этого необходимо интегрировать МКРС с технологией ансамблевого прогнозирования стока «ERF», созданной в РГГМУ в 2013 г. (в рамках проекта «Разработка технологии ансамблевого прогнозирования паводков и половодий как основы автоматизированной системы принятия решений в условиях гидрологической катастрофы») и включающей, помимо модели MLCM2, ещё четыре модели: модель «Сакраменто» (The Sacramento Soil Moisture Accounting model, SAC-SMA), модель HBV и модель «Sugawara» [11].

Изменения климата и переменная антропогенная нагрузка учитываются при:

- 1) определении точек разладки в блоке гидрологических расчётов МКРС (см. рис. 3 и 4);
- 2) выполнении калибровки модели MLCM2 в блоке гидрологических прогнозов МКРС (см. рис. 5 и 6).

Основными достоинствами разработанной технологии являются возможность прогнозирования бокового притока в водохранилища ГЭС с малоизученных и неизученных водосборов, возможность прогнозирования риска формирования катастрофических паводков с заблаговременностью до 3–7 дней и высокоточного прогнозирования паводков с заблаговременностью до нескольких часов, возможность заблаговременного оценивания гидрометеорологической уязвимости объектов гидроэнергетики в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки на речные водосборы, а также возможность расчёта основных гидрологических характеристик, используемых для проектирования гидротехнических сооружений, с учётом изменения климата и переменной антропогенной нагрузки на водосборы рек, используемых для производства электроэнергии.

### **Литература**

1. Определение расчетных гидрологических характеристик, СНиП 2.01.14-83, Государственный комитет СССР по делам строительства. – М., 1985.
2. Свод правил «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», СП 33-101-2003. – М.: Стройиздат, 2004.
3. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеиздат, 1972.
4. Карлин Л.Н., Кузьмин В.А., Дикинис А.В., Иванов М.Э., Шилов Д.В., Бородина Е.Г., Степанова Е.Д., Макин И.С., Чубарова А.В., Румянцев Д.Ю., Шеманаев К.В. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка технологий мониторинга, расчёта и прогнозирования гидрометеорологической уязвимости гидротехнических сооружений в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки». – СПб., 2013.
5. Кузьмин В.А. Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 16–27.



6. Кузьмин В.А. Алгоритмы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования паводков // Метеорология и гидрология, 2009, № 7, с. 92–104.
7. Кузьмин В.А. Аппаратно-программный комплекс «Inwada» по поиску, передаче и хранению гидрометеорологической информации в целях фоновое прогнозирования опасных гидрологических явлений // Естественные и технические науки, 2009, № 6, с. 258–270.
8. Кузьмин В.А. Оценивание увлажненности водосбора по данным дистанционного зондирования, наземных гидрометрических наблюдений и математического моделирования стока // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 45–57.
9. Кузьмин В.А. О возможности повышения заблаговременности прогнозов стока средних рек путем стыковки гидродинамических моделей погоды и гидрологических моделей // Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 16, с. 22–27.
10. Кузьмин В.А. Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков // Метеорология и гидрология, 2009, № 6, с. 74–85.
11. Кузьмин, В.А. Постобработка и корректировка прогнозов паводков, выпускаемых при помощи автоматизированных систем // Метеорология и гидрология, 2009, № 8, с. 80–90.
12. Кузьмин В.А. Принципы автоматической обработки данных в автоматизированных системах прогнозирования стока // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 28–37.
13. Кузьмин В.А. Расчет максимальных расходов весеннего половодья методом оптимизации интегрального поправочного коэффициента // Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 14, с. 5–13.
14. Кузьмин В.А. Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 38–44.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.6 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (проект № 14.516.11.0072 от 27 июня 2013 г.).