

*В.А. Кузьмин, Д.П. Соломатин, Т.П. Проданов,  
Н.А. Рошет, А.А. Полякова, С.В. Еремина*

## **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АНСАМБЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОКА**

*V.A. Kuzmin, D.P. Solomatina, T.P. Prodanov,  
N.A. Roshet, A.A. Polyakova, S.V. Eremina*

## **A SOFTWARE FOR THE STREAMFLOW ENSEMBLE MODELLING AND FORECASTING**

*В работе рассмотрена разработанная в РГГМУ многокомпонентная технология ансамблевого моделирования и прогнозирования стока, реализованная в виде программного обеспечения «ERF» (от англ. «Ensemble Runoff Forecasting» – ансамблевое прогнозирование стока), не имеющего известных аналогов ни в Российской Федерации, ни за её пределами.*

*Ключевые слова: прогнозирование, гидрологическая модель, данные, паводок, технология автоматизированной поддержки принятия решений, ансамблевые прогнозы, снижение неопределенности.*

*In this paper, a new multi-component technology recently developed in RSHU for the streamflow ensemble modelling and forecasting is presented. This technology is implemented in new software, called 'ERF' (Ensemble Runoff Forecasting), which does not have any known analogues neither in the Russian Federation, nor abroad*

*Key words: forecasting, hydrological model, data, floods, technology of automated decision-support, ensemble forecasts, decreasing uncertainty.*

Целью ряда выполняемых в РГГМУ НИР является повышение эффективности управленческих решений и разработка методов и технологий автоматизированной поддержки принятия управленческих решений (АППР) [1–10]. В частности, это может быть сделано на основе ансамблевых прогнозов – вероятностных прогнозов сценариев возможного развития рассматриваемого гидрологического процесса, при котором в явном виде учитываются различные виды неопределённости: неопределённость входных данных, а также неопределённость структуры модели и её параметров [2, 4, 5]. Результатом ансамблевого моделирования и прогнозирования стока является некоторое число возможных сценариев развития рассматриваемого гидрологического процесса (речного стока) [10].

В отличие от вероятностного прогнозирования на основе стохастических моделей, ансамблевое прогнозирование не предполагает определение крайне неустойчивых во времени параметров, выражающих интенсивность «шумов» и поэтому является более надёжным средством получения вероятностных прогнозов [10].

В 2013 г. в РГГМУ была разработана многокомпонентная технология ансамблевого моделирования и прогнозирования стока, реализованная в виде программного обеспечения (ПО) «ERF» (от англ. «Ensemble Runoff Forecasting» –

ансамблевое прогнозирование стока), не имеющего известных аналогов ни в Российской Федерации, ни за её пределами. ПО «ERF» позволяет выполнять следующие расчётно-прогностические и аналитические процедуры:

- 1) Генерирование ансамблей (возможных сценариев) гидрологических процессов по различным видам гидрологических моделей;
- 2) Генерирование ансамблей по различным видам входных гидрометеорологических данных;
- 3) Генерирование ансамблей по различным наборам (векторам) параметров отдельной гидрологической модели;
- 4) Детерминистическое прогнозирование стока с использованием лишь одной модели из четырёх имеющихся (в этом случае генерируется один сценарий для одной модели с одним набором входных данных и одним фиксированным набором параметров);
- 5) Статистический анализ сгенерированных сценариев, включающий расчёт статистических характеристик ансамблевого прогноза.

На рис. 1 представлена принципиальная схема ПО «ERF».

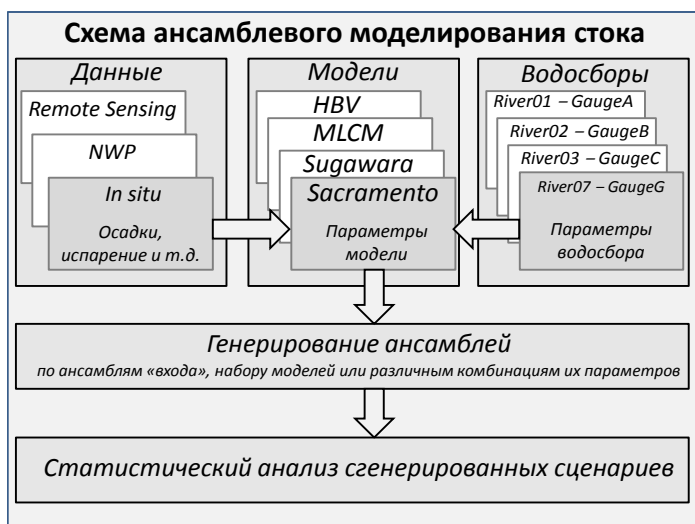


Рис. 1. Принципиальная схема программного обеспечения «ERF»

Выбор гидрологической модели в общем случае зависит от её адекватности по отношению к моделируемому природному процессу, наличия необходимых входных данных, наличия эффективного инструментария для её параметризации (в частности, автоматической калибровки) и возможности использования «выхода» этой модели для дальнейшего использования для АППР [2, 4, 5, 10]. Поэтому в данной работе выбор конкретных моделей для дальнейшего генерирования ансамблей основывался на одновременном учёте всех перечисленных основных факторов. Наибольшей гибкостью и функциональностью из рассмотренных моделей обладают следующие четыре модели:

- 1 Модель MLCM2 (РГГМУ, Россия) [2, 4–6];
- 2 Модель «Сакраменто» (The Sacramento Soil Moisture Accounting model, США) [11];
- 3 Модель HBV (Швеция) [10, 12];
- 4 Модель «Sugawara» (Япония) [10, 12].

В качестве исходных данных могут быть использованы все существующие виды источников гидрометеорологической информации (ГМИ). Комплексное использование разнородных гидрометеорологических данных, поступающих из различных источников позволяет выполнять прогнозирование стока не только с изученных, но и с малоизученных и неизученных (в метеорологическом и гидрологическом отношении) водосборов [1, 10].

Источники модельной неопределенности (т.е. исходящей от моделирования и используемых моделей) могут быть сгруппированы следующим образом:

1. Случайные или систематические ошибки в модельных входах (граничных или начальных условиях) («неопределенность входных данных»);
2. Случайные или систематические ошибки в измеренных данных выхода используемых для калибровки моделей и измерения точности моделирования («неопределенность выходных данных»);
3. Неопределенности, связанные с неверными или субоптимальными значениями параметров («параметрическая неопределенность»);
4. Неопределенности, связанные с неадекватной или неполной структурой модели («структурная неопределенность»);
5. Комбинация различных видов неопределенности.

При выборе стратегии разработки программного обеспечения авторы руководствовались следующими соображениями:

- 1) Разрабатываемое программное обеспечение (ПО) должно обеспечивать генерирование ансамблей (возможных сценариев развития моделируемого гидрологического процесса) по различным моделям, по различным данным и по различным параметрам одной модели [10–13];
- 2) минимальный по численности ансамбль должен состоять из одного сценария, построенного по выбранным пользователем данным, модели и параметрам;
- 3) ПО должно допускать использование пользовательских настроек и настроек, заданных по умолчанию;
- 4) ПО должно быть совместимо с ОС Windows;
- 5) ПО должно обеспечивать графическое представление генерируемых ансамблей;
- 6) ПО должно содержать средства статистической обработки результатов ансамблевого моделирования и прогнозирования гидрологических сценариев;
- 7) ПО распространяется пользователям через сеть интернет (скачивается с сайта проекта или FTP-сайта, доставляется через внешние файлообменники).

Разработанная веб-страница программного обеспечения «ERF» позволяет авторизованным пользователям выполнять моделирование речного стока в интерактивном режиме. Возможен выбор английского или русского языка графического интерфейса программы, дальнейшее описание приведено для русского варианта графического интерфейса.

Метод выпуска ансамблевых прогнозов стока, так и программное обеспечение технологии ансамблевого моделирования и прогнозирования стока должны обеспечивать выполнение следующих процедур:

При выборе сценария можно загрузить существующий сценарий из базы данных либо выбрать новый, а также возможность редактировать сценарий. При создании нового сценария пользователь загружает файлы с данными о водосборе, далее следует загрузить данные о фактическом стоке.

Выбор типа ансамбля: выбор способа генерирования ансамблей (по моделям, по данным или по параметрам); выбор одной или нескольких моделей из предлагаемого списка – выбор модели одинарный при типе ансамбля «Параметры» и «Данные», но множественный при типе «Модель».

При выборе параметров:

– Если тип ансамбля – «Модель», то происходит переключение между моделями, для каждой модели наборы параметров разные; при этом набор параметров для модели можно выбрать самостоятельно;

– Если тип ансамбля – «Параметры», то выбор параметров множественный, иначе одинарный; устанавливает для модели набор параметров, помеченных флагом «Лучшие», если такой есть; или же устанавливает для модели стандартный набор параметров «Параметры по умолчанию».

По умолчанию интервал ансамбля равен максимальному общему интервалу всех выбранных осадков и фактического стока. Результат ансамбля сохраняется в выбранный файл. Также существует возможность добавления нового сценария, редактирование выбранного сценария, удаление выбранного сценария. Основные вкладки ПО «ERF», предназначенные для использования описанных опций представлены на рис. 2–5.

Полная процедура подготовки данных учитывает рекомендации ВМО [10] и включает получение необработанных данных с внешних носителей, архивирование необработанных данных, документирование и протоколирование их характеристик, анализ и контроль качества поступивших данных, вторичную обработку (заполнение пропусков и пробелов, корректировка и исправление посторонних символов и т.д.), документирование и протоколирование всех изменений в данных, маркировку массивов, архивирование обработанных данных (вместе с их кодами-идентификаторами), определение приоритетности использования различных данных, если одни и те же метеорологические переменные описываются различными массивами данных и, наконец, формирование единого массива данных для дальнейшего использования в прогностических целях [4, 5, 7, 9, 10–13]. Для формирования единых массивов данных необходимо выполнить следующие шаги [10]:

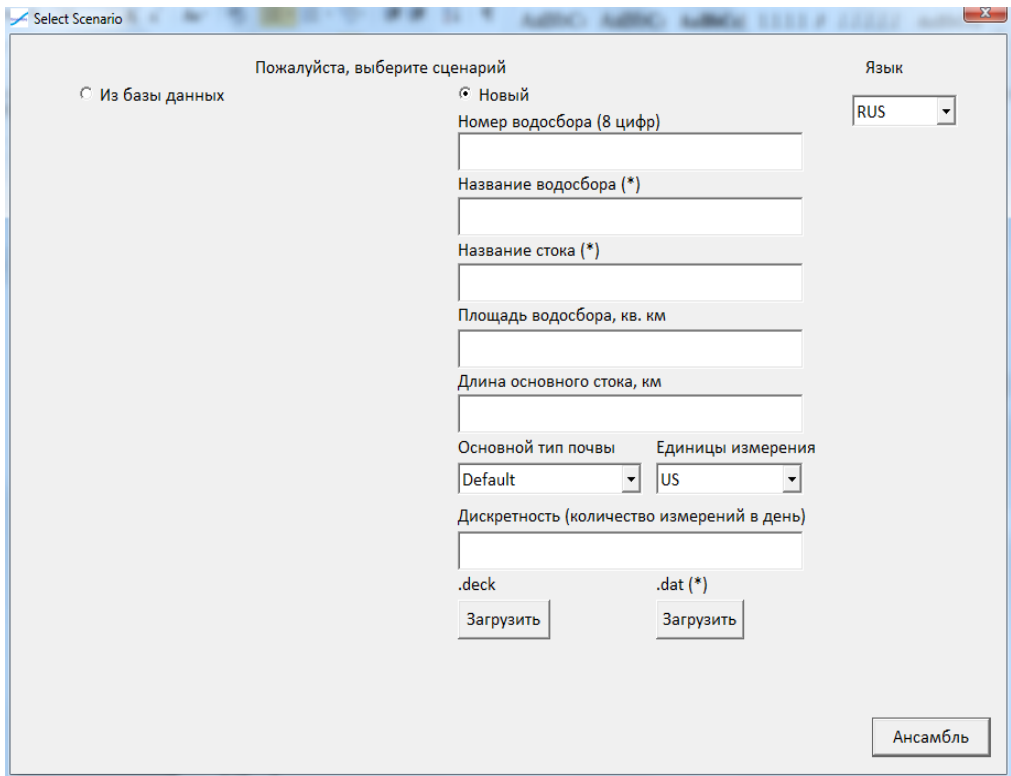


Рис. 2. Пользовательский интерфейс программного обеспечения «ERF»: вкладка ввода данных о водосборе

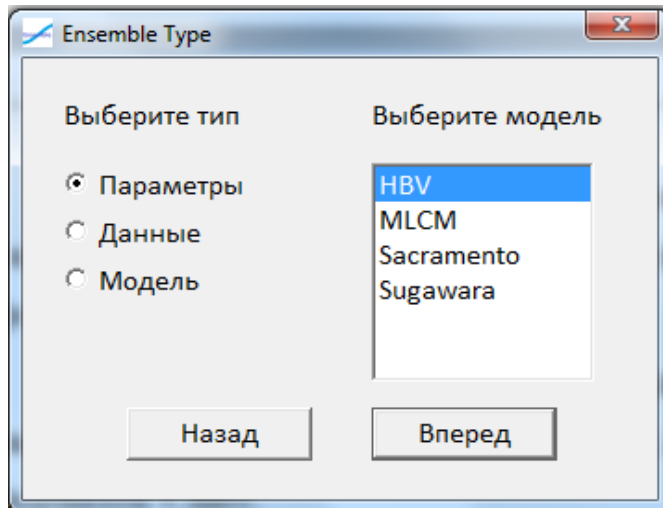


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программного обеспечения «ERF»:

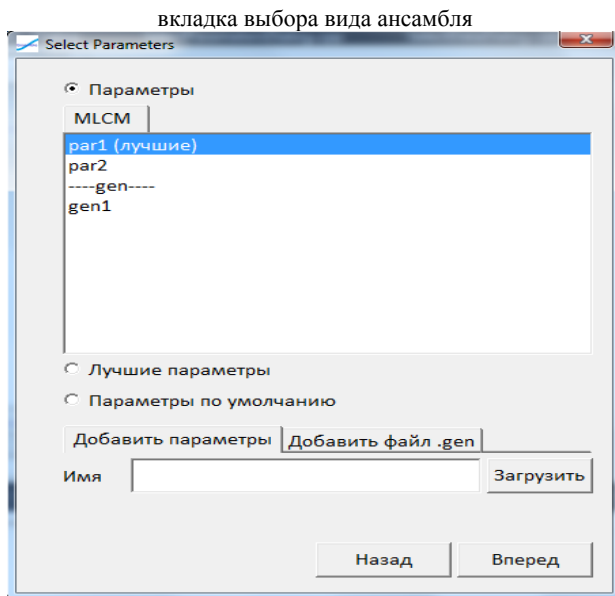


Рис. 4. Пользовательский интерфейс программного обеспечения «ERF»: вкладка выбора набора параметров модели

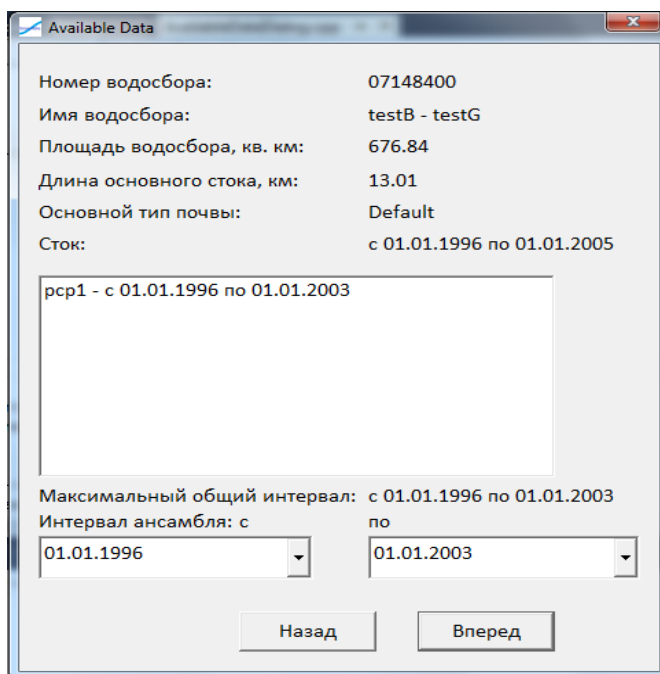


Рис. 5. Пользовательский интерфейс программного обеспечения «ERF»: вкладка контроля параметров и выбора временного интервала для тестовых ансамблевых прогнозов

1) Установить приоритетность использования каждого вида исходных (необработанных или обработанных) данных из имеющегося списка путём определения наилучшего значения целевой функции для каждого вида данных и последующего ранжирования видов (источников, способов обработки и т.д.) данных в порядке возрастания значения целевой функции. Вид данных, соответствующий наименьшему значению целевой функции считается самым приоритетным и используется в первую очередь.

2) Проверить целостность приоритетного вида данных. Если массив является полным (то есть не имеет пропусков или ошибок, или если имеющиеся пропуски не снижают качества прогнозов), то этот массив используется для прогнозирования стока без каких-либо дальнейших изменений или преобразований. Если массив является неполным, пропуски данных заполняются на основе корреляции со следующим по приоритетности полным массивом данных. Если полных массивов нет, все пробелы заполняются на основе множественной корреляции по всем имеющимся массивам данных.

3) Установить приоритетность восстановленных данных так же, как это сделано в п. 1.

4) В качестве единого массива использовать восстановленный массив с наивысшим приоритетом.

Разработанная технология может быть использована в качестве основы для автоматической поддержки принятия управленческих решений на основе прогностической информации, а также для повышения эффективности таких решений в условиях гидрологических катастроф и чрезвычайных ситуаций.

Оценив вертикальную структуру исследуемой части Тихого турбулентное и волновое перемешивание, вызванное сильными ветрами при прохождении ТЦ, было вполне способным эродировать термоклин и вовлечь тем самым в верхний перемешанный слой относительно холодные воды.

### ***Литература***

- 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.
- Кузьмин В.А.* Алгоритмы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования паводков // Метеорол. и гидрол., 2009, № 7, с. 92-104.
- Кузьмин В.А.* Аппаратно-программный комплекс «Inwada» по поиску, передаче и хранению гидрометеорологической информации в целях фонового прогнозирования опасных гидрологических явлений // Естественн. и технич. науки, 2009, № 6, с. 258-270.
- Кузьмин В.А.* Оценка влажности водосбора по данным дистанционного зондирования, наземных гидрометрических наблюдений и математического моделирования стока // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 45-57.
- 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.

- Кузьмин В.А.* Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков // Метеорол. и гидрол., 2009, № 6, с. 74-85.
- Кузьмин В.А.* Постобработка и корректировка прогнозов паводков, выпускаемых при помощи автоматизированных систем // Метеорол. и гидрол., 2009, № 8, с. 80-90.
- Кузьмин В.А.* Принципы автоматической обработки данных в автоматизированных системах прогнозирования стока // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 28-37.
- Кузьмин В.А.* Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 22, с. 38-44.
- Guide to Hydrological Practices. Fifth edition [Text] / World Meteorological Organization, Geneva, WMO No. 168, 1994. – 739 p.
- Burnash, R.J.C.*, 1973. Technical Report: A generalized streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers // Joint Federal and State River Forecast Center. US NWS and California DWR. – Sacramento, CA. – 204 p.
- Barrett, D.* Improved stream flow forecasting by coupling satellite observations, in situ data and catchment models using data assimilation methods // eWater CRC Technical Report. – 2008. – 77 p.
- Zhu, T., and D.-L. Zhang* (2006). The impact of the storm-induced SST cooling on hurricane intensity, *Adv. Atmos. Sci.*, 23, 14–22, doi:10.1007/s00376-006-0002-9.
- Kuzmin, V., Seo, D.-J., Koren, V.* Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search // *Journal of Hydrology*, vol. 353, iss. 1–2, 2008, p. 109-128.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.5 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (проект № 14.В37.21.1977 от 14 ноября 2012 г.).