

сети CRAY // 80 лет Гидрометцентру России. – М., ТРИАДА ЛТД – 2010. – С. 423-434.

4. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.

5. Степанов Ю.А., Жабина И.И. Новая версия автоматизированной технологии АСООИ на выделенном сервере Гидрометцентра России // М.: Труды Гидрометцентра России. –2011. – Вып. 346. - С. 146-169.

6. *Golnaraghi M.* Institutional Partnerships in Multy-Hazards Early Warning Systems: A compilation of Seven National Good Practices and guiding Principles. Springer, 2012 – 350 p.

7. Manual on Flood Forecasting and Warning. // World Meteorological Organization - No. 1072, Geneva, 2011. –138 p.

**ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТА OpenMI  
ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ НАВОДНЕНИЙ  
(на примере среднего Амура)**

Бугаец А.Н.<sup>1,2</sup>, Мотовилов Ю.Г.<sup>3</sup>, Беликов В.В.<sup>3</sup>, Гельфан А.Н.<sup>3</sup>,  
Гончуков Л.В.<sup>4</sup>, Дод Е.В.<sup>5</sup>, Калугин А.С.<sup>3</sup>, Крыленко И.Н.<sup>3,4</sup>,  
Морейдо В.М.<sup>3</sup>, Норин С.В.<sup>3</sup>, Румянцев А.Б.<sup>3</sup>, Сазонов А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

<sup>2</sup>Дальневосточный региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт, г. Владивосток

<sup>3</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>5</sup>ОАО «РусГидро», г. Москва

hydrowpi@mail.ru

Возможности повышения эффективности управления риском наводнений – осуществления мер, позволяющих минимизировать наносимый наводнениями социально-экономический и экологический ущерб, – связаны, в значительной степени, с развитием методов оценки опасности, риска и возможных размеров будущих наводнений с учетом природных и антропогенных изменений, повышением заблаговременности и точности прогнозов формирования и

развития наводнений в реальном времени. Развитие перечисленных неструктурных мер защиты от наводнений создает основу для поддержки решений о выборе, повышении надежности и экономической эффективности структурных мероприятий — строительства водохранилищ, защитных дамб, изменения морфометрии русел и т.п., которые направлены на обеспечение необходимого уровня безопасности населения, социальных и производственных объектов.

В экономически развитых странах информационное обеспечение поддержки принятия решений по управлению риском наводнений осуществляется с использованием современных математических моделей формирования речного стока на водосборе и распространения паводковых волн в речных системах, моделей гидрогеологических процессов и русловых деформаций, моделей функционирования водохозяйственных систем и экологического риска, мезомасштабных метеорологических моделей и др. Выбор и объединение в действующую систему большого числа моделей, разнородных по структуре, детальности, требованиям к исходной информации – нетривиальная проблема, решение которой усложняется постоянным усовершенствованием старых и появлением новых моделей, развитием вычислительной техники, средств передачи информации, технологий измерений, сетевых ресурсов и т.п., появлением новых управленческих задач (например, при планировании гидротехнического строительства). Возможности решения этой проблемы связаны с созданием компьютерных технологий, инвариантных по отношению к особенностям используемых моделей, средств хранения и передачи данных, что позволяет интегрировать эти модели и средства в одну систему и сравнительно легко менять компоненты системы по мере разработки, например, более совершенных моделей, появления новых задач и объектов. Применение такой технологии – стандарта OpenMI – для разработки интегрированной системы информационной поддержки управления риском наводнений путем объединения современных гидрологических моделей (физико-математической модели формирования стока ECOMAG [1], одномерной гидродинамической модели MIKE 11 [2] и двумерной гидродинамической модели STREAM-2D [3]) продемонстрировано в настоящей статье на примере оценки влияния Зейского водохранилища на снижение опасности затопления в районе г. Благовещенска.

**Интеграция моделей в системе OpenMI.** Основой создания интегрированной системы является открытый стандарт моделиро-

вания OGC OpenMI 2.0 (OpenModellingInterface, [www.openmi.org](http://www.openmi.org)), разработанный консорциумом ведущих европейских институтов и коммерческих организаций в области гидроэкологии [4,5]. OpenMI – современный протокол обмена данными, позволяющий объединять численные модели, созданные на разных вычислительных платформах, имеющие разные требования к составу и пространственно-временному разрешению исходной информации и взаимодействующие с разными базами данных, средствами визуализации и т.п. OpenMI-совместимые модели могут объединяться в комбинированные системы по принципу plug&play (автоматического распознавания совместимости) и осуществлять обмен данными непосредственно в оперативной памяти компьютера без дополнительного программирования.

В ходе преобразования к стандарту OpenMI вычислительные ядра моделей ECOMAG (FORTRAN) и STREAM-2D (C++) были выведены в динамические библиотеки, предоставляющие внешним приложениям функции инициализации, выполнения расчетного шага и завершения. Модели могут работать как в своем обычном режиме, так и в системе OpenMI. Модель MIKE 11 имеет встроенную производителем поддержку OpenMI. Компонент ECOMAG может предоставлять данные о боковом и русловом притоке в любой точке (или на участке) раstra русловой сети. В процессе инициализации на основе данных, полученных из собственной БД компонента, создается необходимое количество портов обмена и физическое описание их содержимого. Компонент STREAM-2D на основе собственной пространственной структуры создает порты ввода, в которых ожидает данные о русловом и боковом стоке от ECOMAG и MIKE 11.

Для составления цепи расчетных элементов и соединения портов обмена данными использован графический интерфейс пользователя OpenMI (рис.1).

Соединения между моделями создаются указанием модели-источника данных и модели-потребителя, корректность соединения определяется пользователем.

В процессе расчетов компонент STREAM-2D запрашивает данные на своих верхних входных границах у ECOMAG и MIKE 11. Они выполняют соответствующее количество расчетных шагов до тех пор, пока не достигнут указанного в запросе времени. После этого STREAM-2D запрашивает и получает данные из соответст-

вующих портов вывода компонентов-поставщиков данных, передает их непосредственно на верхние границы и выполняет расчет. После завершения всех расчетов, пользователь может просмотреть результаты работы каждой модели, используя их собственные пользовательские интерфейсы.

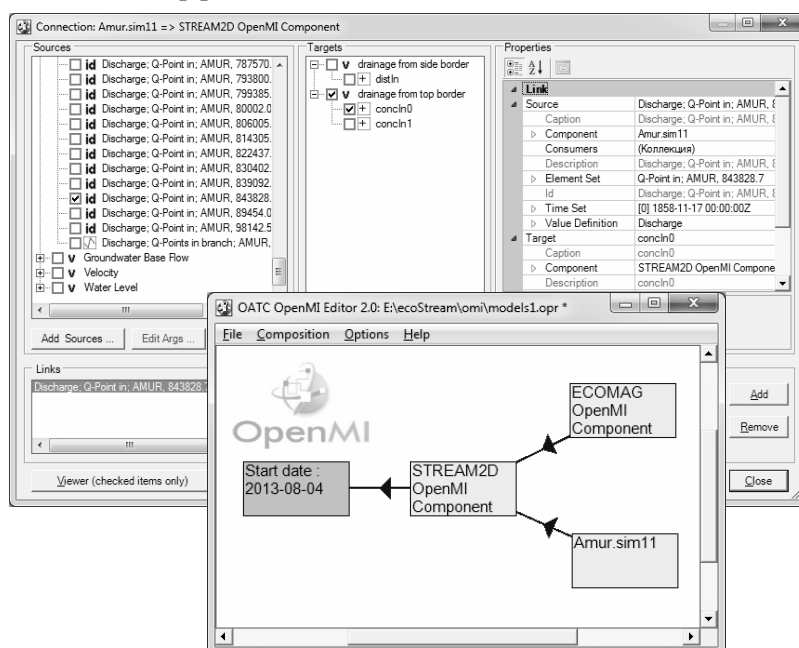


Рис. 1 – Компоненты интегрированной системы моделирования в окне конфигуратора GUI OpenMI

**Описание численных экспериментов и результатов применения интегрированной системы гидрологического моделирования для оценки риска наводнений в бассейне Среднего Амура.** Влияние регулирования Зейским водохранилищем катастрофического паводка 2013 г. на водный режим Среднего Амура впервые оценено с использованием моделей ECOMAG и MIKE 11 в [6,7]. В рассматриваемой работе численные эксперименты проведены на основе описанной выше интегрированной системы, включающей, помимо указанных, двумерную гидродинамическую модель STREAM-2D, также применявшуюся ранее для моделирования течений р. Амур в районе г. Благовещенска [8].

Для моделирования прохождения паводочной волны 2013 г. был выбран участок долины р. Амур вблизи г. Благовещенска, включая нижнее течение р. Зеи (рис.2).

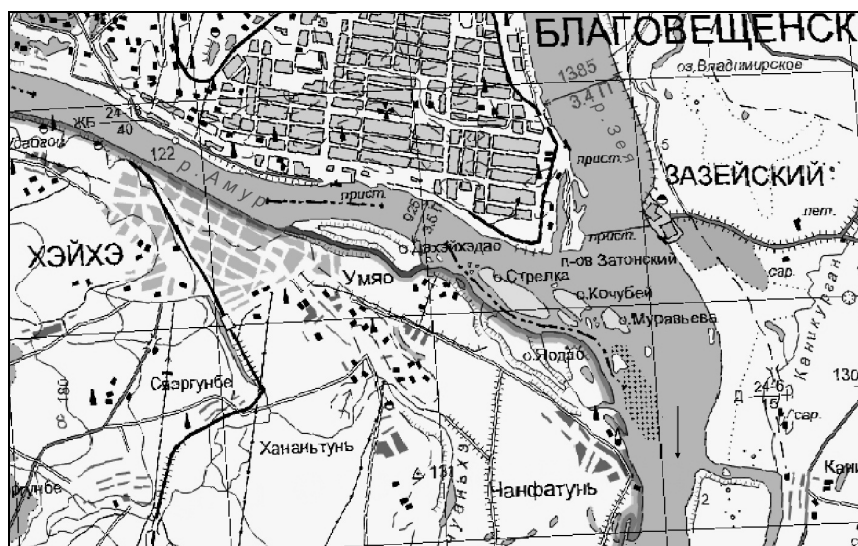


Рис. 2 – Карта района исследований вблизи г. Благовещенска

Расчеты стока в бассейне р. Зеи проводились по модели ЕСОМАГ. Калибровка параметров модели для водосбора р. Зеи и результаты независимых испытаний модели описаны в [6,7]. Одномерная гидродинамическая модель движения паводковой волны в речном русле на основе уравнений Сен-Венана MIKE 11 построена для 850-километрового участка Среднего Амура от г/п Кумара до впадения р. Сунгари с привлечением стандартной морфометрической и гидрометрической информации [6,7] и использована для задания граничных условий в модели STREAM-2D. Эта модель применена для расчётов параметров течения на участке вблизи г. Благовещенска. В основу модели заложена двумерная нестационарная система уравнений мелкой воды, описывающая движение жидкости в горизонтальной плоскости.

В качестве исходных данных для построения рельефа дна использовались результаты инженерно-гидрографической съемки участков русел рек Амур и Зея протяженностью более 23 км, выполненной в июле 2011 г., а также цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная по стереопаре снимков спутника WorldView-1 (США)

22.09.2011 [8]. Расчетная область схематизировалась триангуляционным методом. По всему участку поверхности было получено сгущение по граням треугольников с шагом в 10 м. Массив точек, полученных сгущением по поверхности, использовался при интерполяции рельефа на расчетную сетку модели. Для расчёта использовалась треугольная сетка нерегулярной структуры со сгущением в русле рек. Для увеличения производительности количество ячеек в модели было снижено до 10000 (при стандартном значении для подобных объектов ~50000). Данное огрубление влияет на локальные особенности потока, но позволяет адекватно описать картину течений в общем на исследуемом участке.

Для задания верхних границ при расчете течений на участке вблизи г. Благовещенска, модель STREAM-2D с помощью соединений OpenMI управляет работой моделей MIKE 11 и ECOMAG, получая от них, соответственно, расчетные гидрографы рек Амур и Зея.

На нижней границе расчетного участка задавалась зависимость  $Q=f(H)$  для г/п Гродеково. Результаты расчетов затопления на 14.08.2013 г. были совмещены с оцифрованными по космоснимку на эту дату границами затопления местности (рис. 3).

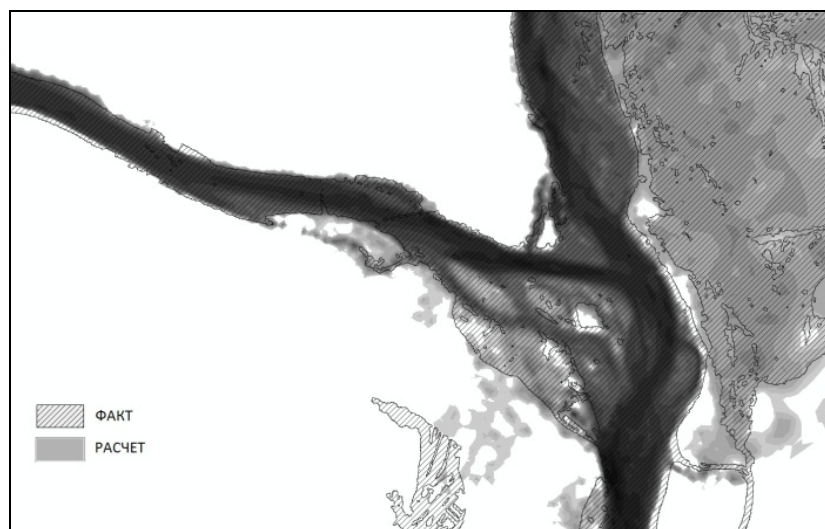


Рис. 3 – Фактические и расчетные границы затопления территории вблизи г. Благовещенска на 14.08.2013 г.

Как видно из рис. 3, разработанная моделирующая система позволила с удовлетворительной точностью оценить границы затопления у г. Благовещенска на пике экстраординарного паводка 2013 года.

При оценке противопаводковой функции Зейского водохранилища в первом эксперименте моделирование гидрографа стока в устье р. Зеи выполнялось с учетом фактических сбросов из водохранилища; во втором – в створе Зейского г/у в качестве сбросов задавался гидрограф притока воды к водохранилищу, т.е. задавался гипотетический сценарий отсутствия Зейского водохранилища. Срезка пика максимального притока 11.7 тыс. м<sup>3</sup>/с в водохранилище Зейским г/у на 1 августа составила ~ 10 тыс. м<sup>3</sup>/с. Разница в расходах воды р. Амур ниже слияния с р. Зеей, рассчитанных по двум сценариям, на 7 августа составила около 7.5 тыс. м<sup>3</sup>/с (рис.4). Срезка расхода воды р. Амур ниже слияния с р. Зеей при прохождении основного пика гидрографа 20 августа вследствие совпадения по времени повышенных сбросов из Зейского водохранилища и прохождения пика волны паводка на р. Селемдже составила свыше 2.3 тыс. м<sup>3</sup>/с.

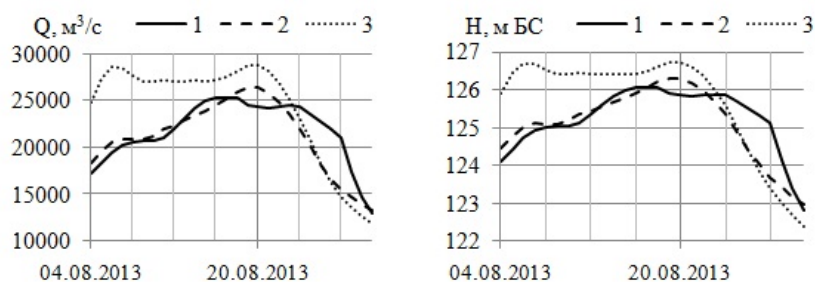


Рис. 4 – Фактические (1) и рассчитанные с учетом фактических сбросов из Зейского водохранилища (2) и при отсутствии регулирования стока водохранилищем (3) расходы и уровни воды р. Амур в 2013 г. в районе г. Благовещенска

Результаты расчетов границ и глубин затопления территории вблизи г. Благовещенска по двум сценариям представлены на рис. 5. Эти эксперименты показали, что регулирование стока Зейским водохранилищем существенно ослабило последствия наводнения на участке Среднего Амура в районе г. Благовещенска. В частности, расчеты трансформации волны паводка по гидродинамической модели показали, что отсутствие регулирующей емкости Зей-

ского водохранилища могло привести к росту уровней воды на подъеме волны паводка (7 августа) в районе г. Благовещенска на 1.5 м, а в пик паводка на р. Амур (20 августа) – к росту уровней на 0.45 м (рис. 4).

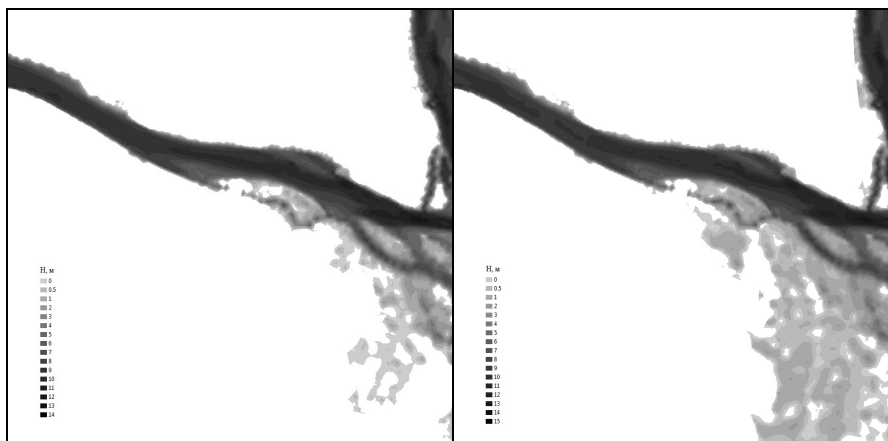


Рис. 5 – Расчетные с учетом фактических сбросов из Зейского водохранилища (слева) и при отсутствии регулирования стока водохранилищем (справа) глубины затопления территории вблизи г. Благовещенска на 14.08.2013 г.

Таким образом, регулирование стока Зейским водохранилищем позволило не только значительно снизить максимальные уровни на рассматриваемом участке р. Амур, но и в 2 раза сократить время стояния высоких вод.

### Литература

1. *Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland L., Rodhe A.* Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1999. V.98-99. P.257-277.
2. <http://www.mikepoweredbydhi.com/>
3. *Belikov V.V., Semenov A.Yu.* A Godunov's Type Method Based on an Exact Solution to the Riemann Problem for the Shallow-Water Equations // *Proc. 4 Eur. Comp. Fluid Dyn. Conf. (ECCOMAS 98)*. WILEY, New York, 1998. V.1. Part 1. P.310-315.
4. *Бугаец А.Н.* Применение стандарта OpenMI для создания интегрированных систем гидрологического моделирования // *Метеорология и гидрология*. 2014. №7. С.93-105.



5. *Gregersen J.B., Gijbbers P.J.A., Westen S.J.P.* OpenMI: Open modelling interface // *Journal of Hydroinformatics*. 2007. V.9(3). P.175–191.

6. *Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С.* Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // *Водные ресурсы*. 2014. Т.41. №2. С.111-122.

7. *Мотовилов Ю.Г., Данилов-Данильян В.И., Дод Е.В., Калугин А.С.* Оценка противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура на основе физико-математических гидрологических моделей // *Водные ресурсы*. 2015. Т.42. №3. С.1-15.

8. *Беликов В.В., Глотко А.В., Белоусова И.В., Завадский А.С.* Применение численного гидродинамического моделирования для решения проблем пограничных водных объектов Сибири // *Тр. Всеросс. научн. конф. с междунар. участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии»*, Барнаул, 2012. Т.1. С.7-15.

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ПЕРИОД ПРОХОЖДЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ДОЖДЕВОГО ПАВОДКА НА АЛТАЕ В 2014 ГОДУ**

*Васильев О.Ф., Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б.,  
Дьяченко А.В., Коломейцев А.А.*

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул  
zinoviev@iwep.ru

В связи с аномальными гидрометеорологическими условиями – экстремальными дождевыми осадками в предгорьях Алтая в конце мая – начале июня этого года возникла чрезвычайная гидрологическая ситуация, связанная с прохождением дождевого паводка по системе русел бассейна Верхней Оби. Были затоплены и подтоплены большие пойменные территории, имелись человеческие жертвы. Результаты выполненных исследований по прогнозированию и натурным наблюдениям паводковой ситуации на Верхней Оби в 2014 г. обсуждаются ниже.

Физико-географические и климатические предпосылки экстремального паводка на Верхней Оби следующие. Поверхность водосборного бассейна Верхней Оби имеет форму ступенчатого амфитеатра, открытого на север и постепенно понижающегося от горно-