

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ КРЫМСКОГО РАЙОНА В ПЕРИОД ЛИВНЕВОГО ПАВОДКА 2012 Г. НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Е.О. Агафонникова, Т.А. Дьяконова, А.В. Хоперсков, С.С. Храпов
Волгоградский государственный университет
г. Волгоград, Россия, e-mail: infomod@volsu.ru*

FORECAST OF THE DYNAMICS FLOODING OF THE CRIMEAN AREA DURING OF FLASH FLOODS IN 2012 ON THE BASIS COMPUTER SIMULATION

*Volgograd state university
Volgograd, Russian Federation, e-mail: infomod@volsu.ru
E.O. Agafonnikova, T.A. Dyakonova, A.V. Khoperskov, S.S. Khrapov*

Abstract: The dynamics features of the surface waters for the territory of the Crimea area of Krasnodar region in flash flood conditions have been studied. The parameters of flooding depending on the precipitation intensity have been defined.

Введение

Проблема прогноза гидрологического режима поверхностных вод является жизненно актуальной для значительной территории страны [Васильев, 2012, Шокин, 2007]. Отметим три направления, связанные:

- с сезонными паводковыми затоплениями;
- с чрезвычайными ситуациями (ЧС), обусловленными неблагоприятными метеорологическими условиями (сильные ливни, продолжительные дожди);
- с разрушением или авариями на гидротехнических сооружениях [Бельчиков В.А.].

В ряде случаев имеется одновременное выполнение перечисленных условий. Примерами такого рода ЧС последних лет являются прорыв 150-метровой плотины ГЭС у города Пасни (2005), на реке Чу во Вьетнаме (2007), аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (2009), на шламонакопителе ОАО «Аммофос» (Вологодская область, 2010), на переливной плотине Саратовского оросительно-обводнительного канала (2010) и др [Труды гидрометцентра, 2006].

В данной работе описаны результаты имитационного моделирования [Воронин А.А., 2012] динамики поверхностных вод на основе прямых гидродинамических методов для территории Крымского района и прилегающих горных территорий Краснодарского края с целью изучить некоторые особенности динамики паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6 на 7 июля 2012 года.

Выявлено несколько причин возникновения ЧС. По официальным данным ФГБУ «ГГИ» [Отчет ЧС, 2012] главной причиной катастрофического наводнения 2012 г. в Крымском районе явились чрезвычайно интенсивные ливневые осадки, не наблюдавшиеся ранее в данном регионе. В период с 22 часов 6 июля по 03 часа 7 июля в бассейне р. Адагум шел непрерывный ливень с интенсивностью 35–45 мм/ч, который вызвал катастрофический паводок и, как следствие, наводнения в г. Крымске и ст. Нежнебаканской. По данным метеостанций Крымск и Новороссийск общее количество осадков, выпавших за 5 часов, составило 124 мм и 157 мм соответственно.

Наряду с аномальными метеоусловиями решающую роль в затоплении г. Крымска сыграли антропогенные факторы:

- наличие на реке Адагум мостов с часто расположенными опорами (в период паводка недостаточно протяженные мостовые пролеты забиваются карчем, бытовым и промышленным мусором);
- застройка территории поймы прилегающей к реке;
- наличие в русле и пойме реки большого количества техногенного мусора, а также сильно заросших участков.

Данные факторы существенно снизили пропускную способность русла и поймы р. Адагум, что привело к сильному повышению уровня воды в период ливневого паводка и затоплению территории города.

Затопление территории г. Крымска по данным ФГБУ «ГГИ» [Отчет ЧС, 2012] происходило следующим образом:

1. В результате интенсивных осадков в бассейнах рек Баканка и Неберджайка сформировались два паводковых потока, которые слились в единый поток в русле реки Адагум с образованием мощной паводочной волны распространяющейся в сторону г. Крымска. Первым препятствием на пути потока воды стал железнодорожный мост через р. Адагум перед г. Крымском. Пропускная способность моста оказалась недостаточной, чтобы пропустить большой объем воды, насыщенной карчем, в результате чего в треугольнике, образованном двумя железнодорожными насыпями начался подъем уровня воды, достигший 7.10 м, и образовалось искусственное водохранилище со значительным объемом воды. При дальнейшем

поступлении воды произошло перетекание и прорывы значительной части аккумулированного стока в левобережную пойму и его быстрое перемещение в сторону г. Крымск.

2. Следующим подпорным сооружением на пути потока оказался автодорожный мост на въезде в г. Крымск (ул. Новороссийская), пролеты которого были забиты карчем. Здесь наблюдался наибольший подъем уровня, достигший 8.5 м над меженным. Поток устремился на левый берег по ул. Новороссийской, ширина зоны затопления здесь превысила 2 км. По правому берегу также наблюдалось затопление поймы шириной до 700 м. В 1 км ниже моста уровень превысил меженный на 7.8 м.
3. Автомобильный мост в центре города также превратился в искусственную плотину из-за того, что пролеты моста оказались забиты карчем и бытовым мусором, в результате чего вода стала переливаться через мост, а значительная ее часть пошла в обход моста, преимущественно по правобережной части города. Подъем уровня перед мостом составил около 7 м.

В материалах ФГБУ «ГГИ» [Отчет ЧС, 2012] также приведены оценки максимальных расходов и объемов стока в период катастрофического паводка 6–7 июля 2012 г. в бассейне р. Адагум:

- Максимальный расход, прошедший 7 июля по р. Адагум через г. Крымск составил около 1500 м³/с и почти в два раза превысил исторический максимум 2002 г. Обеспеченность (вероятность превышения) этого расхода ориентировочно оценивается равной 0,5 (1 раз в 200 лет). По р. Баканка максимальный расход оценен в 1040 м³/с, а по р. Неберджай в 800 м³/с. Основной вклад в формировании максимального расхода воды р. Баканка внесли ее правые притоки. При этом максимальные модули стока на них достигли рекордных для нашей страны значений 19–21 м³/с км².
- Объем стока р. Адагум в створе гидрологического поста у г. Крымска, прошедший в период паводка 6-7 июля 2012 г. оценен в 40000 тыс. м³, что составляет 38% от нормы годового объема стока.
- Неберджаевское водохранилище в период прохождения паводка выполнило свою аккумулирующую функцию, снизив поступление паводочных вод в р. Адагум в период его наиболее интенсивного развития (до 5 часов 7 июля) примерно на 130 м³/с.

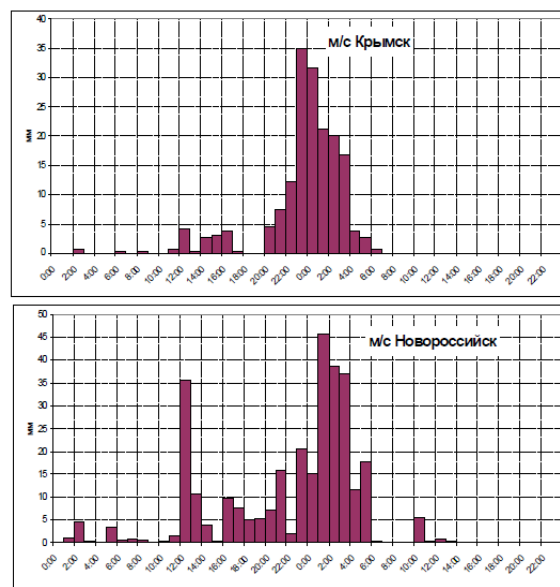
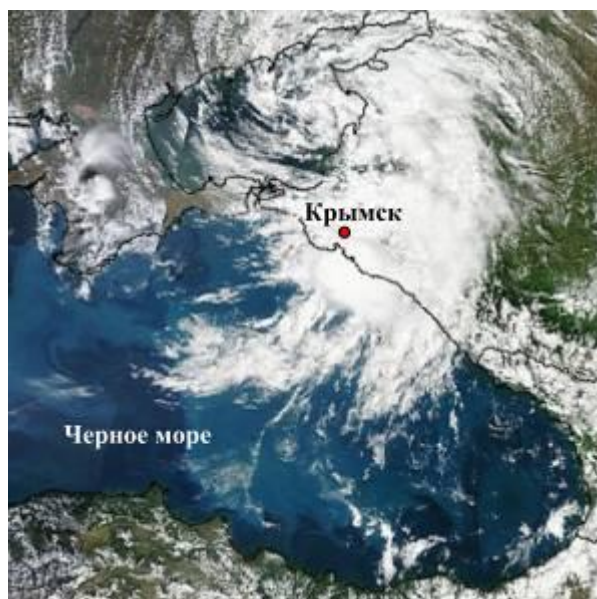


Рисунок 1 – Количество осадков в регионе с 6 по 7 июля 2012 года

1. Программный комплекс «EcoGIS-Simulation»

Расчеты проводились с использованием пакета программ EcoGIS-Simulation, созданного в Волгоградском государственном университете, в частности, для моделирования динамики поверхностных вод на неоднородном рельефе [Храпов, Хоперсков, 2012].

Программный вычислительный комплекс «EcoGIS-Simulation» позволяет на основе прямого гидродинамического моделирования и применения геоинформационных технологий:

- прогнозировать динамику затопления территорий в случае чрезвычайных ситуаций (прорыв плотин (дамб) на водоемах и выпадение обильных (ливневых) осадков, накат на берег нагонных волн и цунами);
- осуществлять экспертизу проектируемых и существующих гидротехнических сооружений на водных объектах и затопляемых участках суши (заградительных дамб, плотин, мостов, каналов, дренажных коммуникаций);
- определять оптимальные гидрологические режимы затопления пойменных территорий в случае регулируемого стока.

Особенностями программного комплекса «EcoGIS-Simulation» являются высокая скорость расчета динамики поверхностных вод на заданной территории. При разработке программного комплекса были использованы современные геоинформационные и суперкомпьютерные технологии, технологии параллельных вычислений и оригинальные эффективные алгоритмы расчета гидродинамических течений [Писарев, 2013].

1.1. Структура программного комплекса

Программный вычислительный модуль «EcoGIS-Simulation» состоит из трех основных компонентов (рис.2):

1. Управляющего модуля, в котором осуществляется подготовка ГИС-проектов и запуск расчетов по моделированию динамики затопления территорий.
2. Расчетного модуля, обеспечивающего проведение расчетов посредством программной реализации гидродинамической нестационарной модели движения жидкости [Khrapov, 2013].
3. Модуля визуализации результатов гидродинамического моделирования.

В программном комплексе реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура, позволяющая пользователю запускать множество расчетов со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах. Управляющий модуль «MainPC» и модуль визуализации «MainVisual» составляют ядро специализированной геоинформационной системы «EcoGIS», которая размещается и запускается на клиентской машине. Расчетный модуль «MainSolve» входит в состав вычислительной подсистемы «Server-Simulation», которая размещается и запускается на удаленном вычислительном сервере.

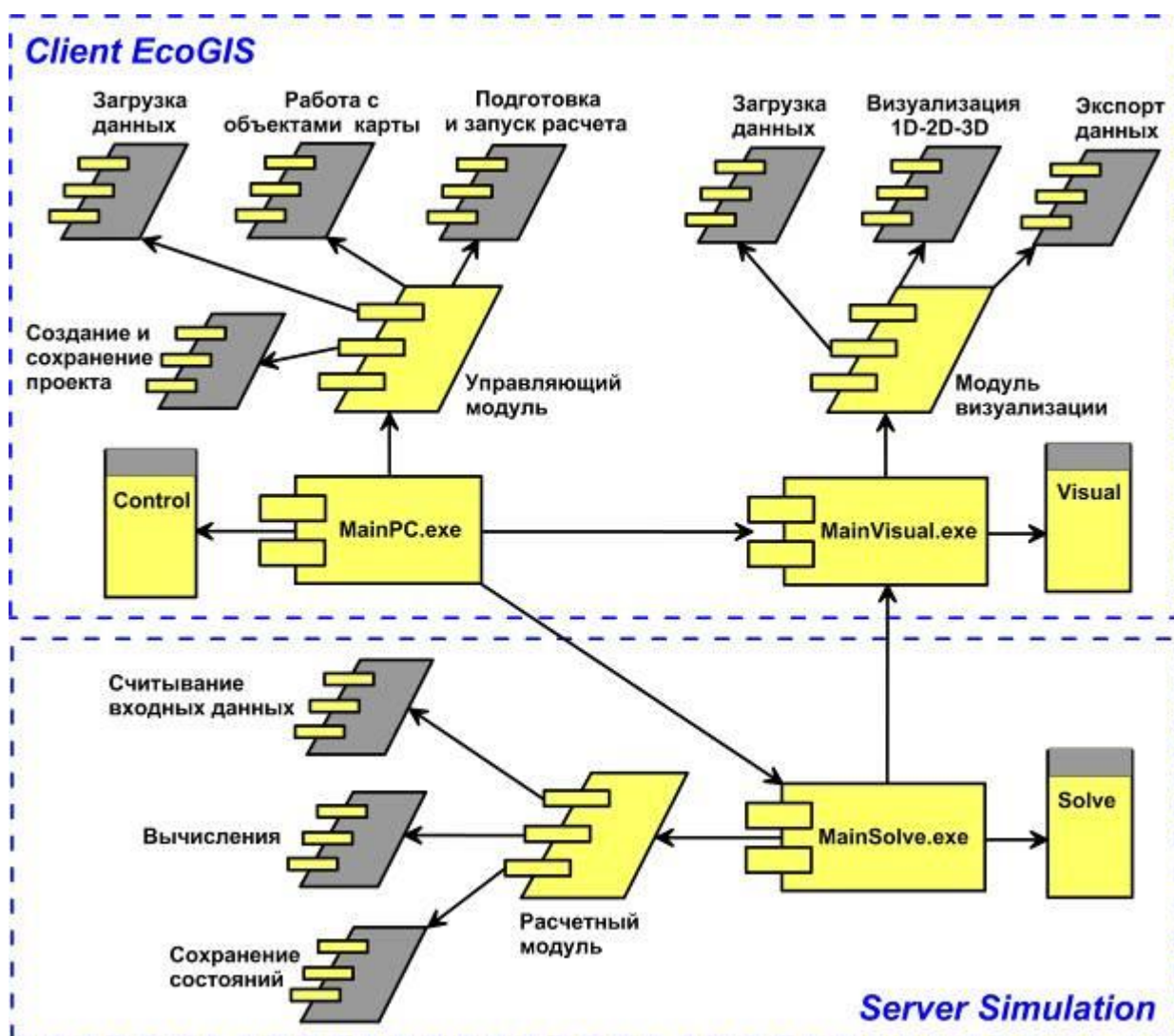


Рисунок 2 – Структура программного комплекса «EcoGIS-Simulation»

1.2. Интерфейс «EcoGIS»

Главное окно приложения «EcoGIS» содержит (рисунок 3):

- главное меню, где находятся основные элементы управления проектом и картой;
- область отображения, необходимую для визуализации карт и матриц высот;
- строку информации, в которой указываются координаты и текущая высота под курсором мыши.

Для проведения компьютерного моделирования [Храпов, 2010] динамики затопления территорий необходимо в «EcoGIS» выполнить следующие этапы:

1. Создать проект, задав имя проекта, область проекта с географической привязкой и пространственное разрешение (сетку).
2. Загрузить или создать матрицу высот, которая представляет собой регулярную цифровую модель рельефа (ЦМР) исследуемого участка местности. Построение ЦМР осуществляется на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), картографических данных и данных GPS/ГЛОНАСС измерений.
3. Нанести на карту местности источники/стоки воды в виде точечных, линейных и площадных объектов. Определить для этих объектов интенсивность притока/оттока воды в зависимости от времени (гидрограф).
4. Создать или загрузить начальное распределение глубины воды скорости течения на карте местности.
5. Задать свойства подстилающей поверхности — величину придонного трения и скорость инфильтрации (впитывания) воды в почву.
6. Определить метеорологические условия — скорость и направление ветра, температуру воздуха и воды, влажность воздуха.
7. Задать параметры расчета — время расчета, интервал сохранения результатов, геометрию расчетной области и граничные условия.
8. Подготовить данные для расчета, выгрузив их в соответствующие входные файлы вычислительного модуля.
9. Запустить расчет на вычислительном сервере доступном пользователю [Храпов, Хоперсков, 2011].
10. После завершения вычислений или в процессе работы расчетного модуля загрузить сохраненные на сервере файлы состояний в модуль визуализации для построения карт затопления исследуемой территории (рисунок 4).

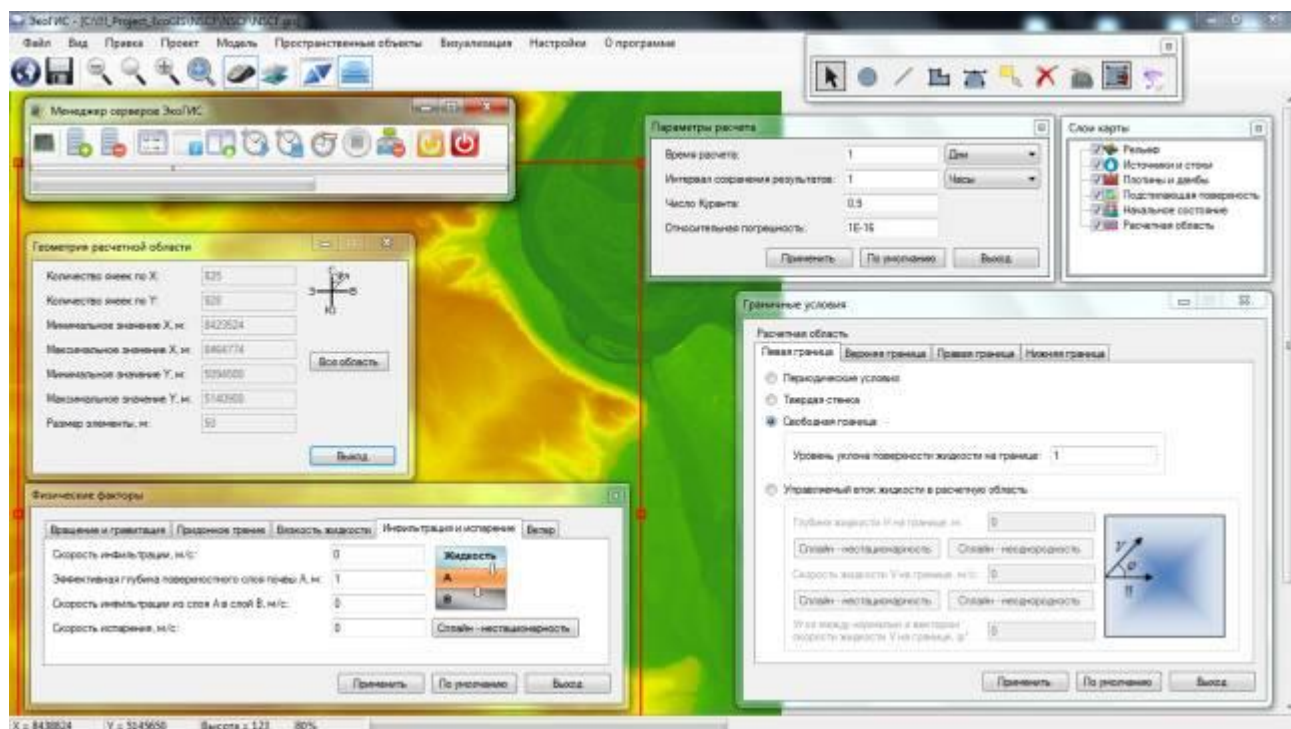


Рисунок 3 – Интерфейс приложения «EcoGIS»

В модуле визуализации можно осуществлять построение: одномерных срезов вдоль заданной на карте местности произвольной прямой; трехмерных поверхностей рельефа и уровней воды. Кроме того, имеется возможность сохранения результатов моделирования в виде GIF-анимации, файлов изображений (PNG, JPG, GIF) и видео (AVI).

Результаты моделирования

Моделирование проводилось на гибридном суперкомпьютере с ускорителями на основе графических процессоров NVIDIA TESLA с использованием параллельных программных модулей по

стандартам MPI-ОренМП-CUDA. Характерное время, затрачиваемое на один расчет с использованием C2070, составляет около 10 минут, что допускает составление прогнозов в режиме RealTime [Храпов, Хоперсков, 2011].

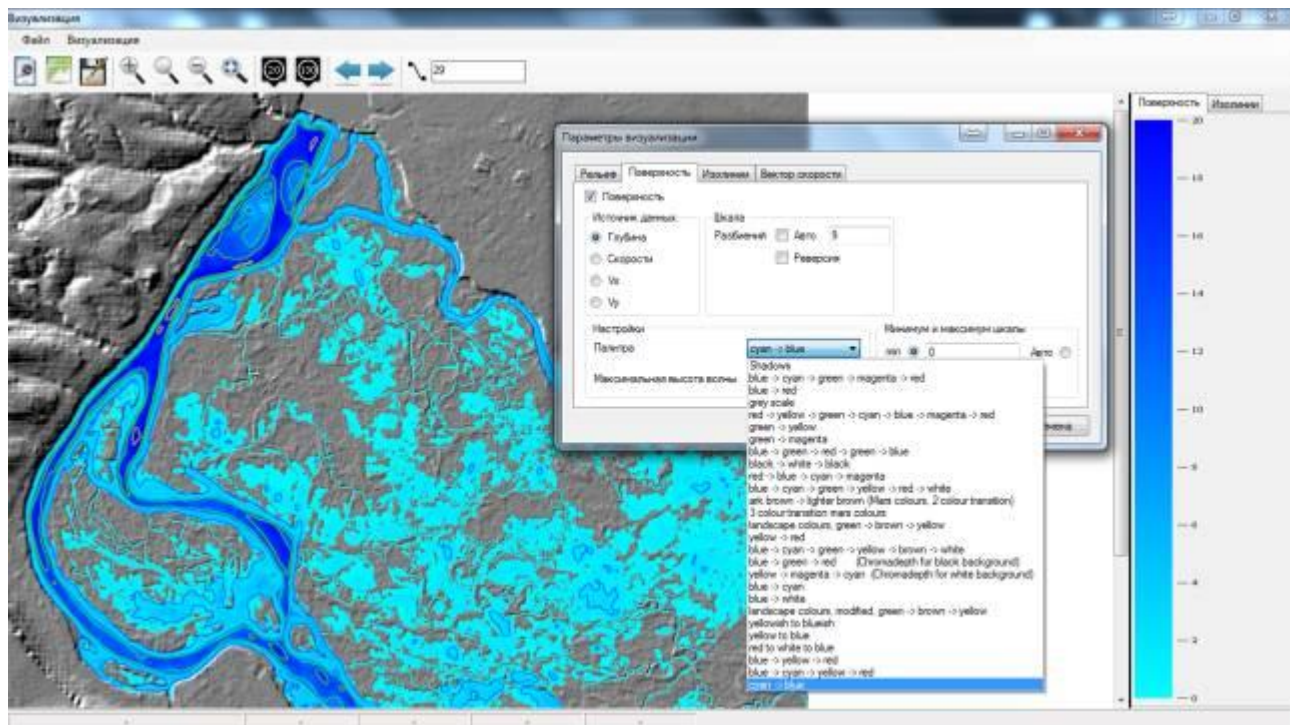


Рисунок 4 – Окно модуля двумерной визуализации

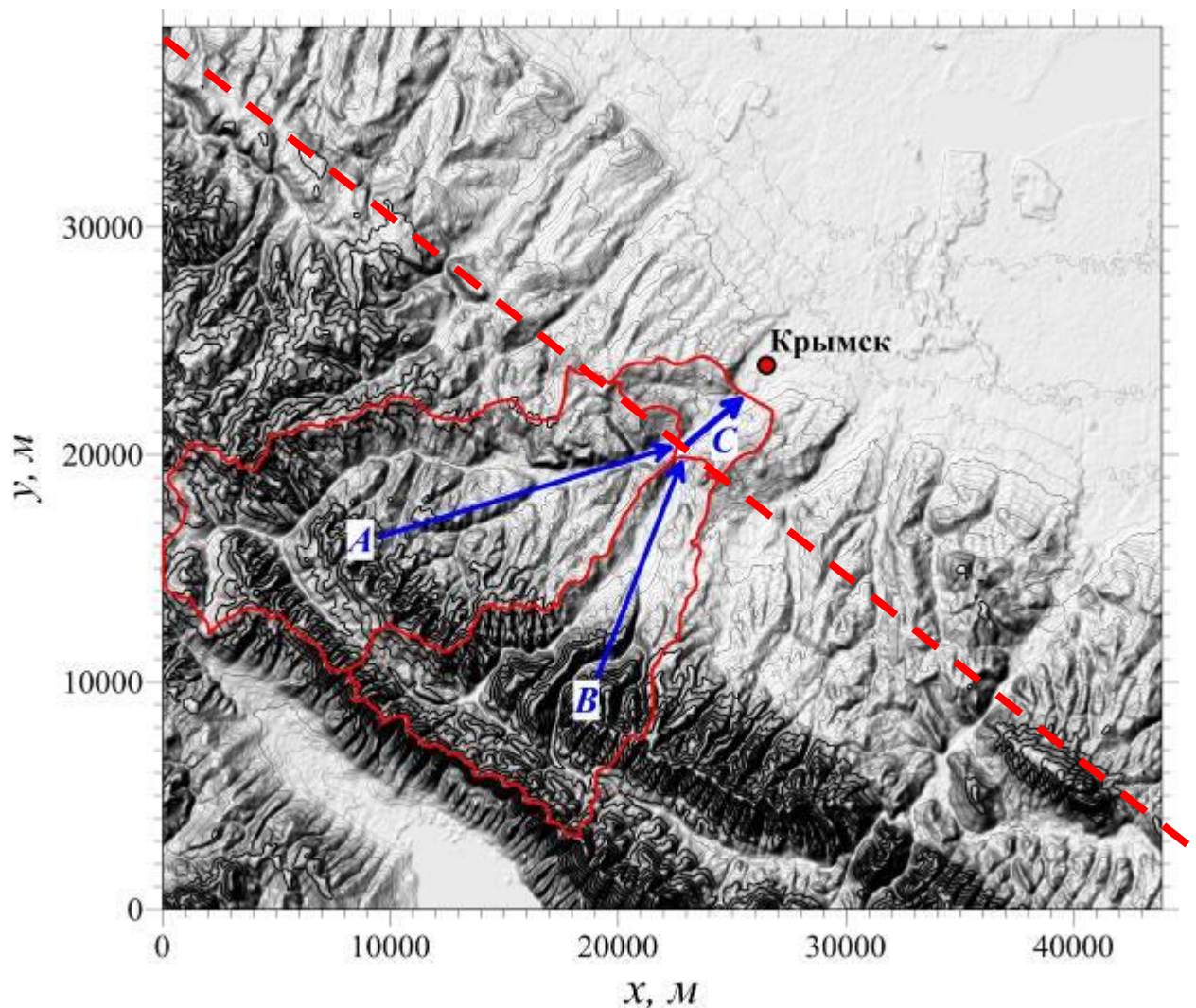


Рисунок 5 – Цифровая модель рельефа Крымского района

На рисунке 5 представлена цифровая модель Крымска и его окрестностей, на которой красная штриховая линия показывает заданную границу области задания осадков ливневого характера с интенсивностью σ [Хоперсков, 2012]. Для первых оценок примем $\sigma = \text{const}$ в течение промежутка времени τ , тем самым объем осадков определяется величиной $W = \sigma\tau$. В серии моделей варьировались значения параметров σ и W [Кучмент, 2005]. Участки *A*, *B*, *C* показывают основные области водосбора. Площадь водосбора реки Баканка составила 179.1 кв.км.(участок *A*), соответственно для реки Неберджайка водосбор был определен в 109.9 кв.км (участок *B*), водосбор участка р. Адагум перед г. Крымск составил 19.05 кв.км. (участок *C*). Таким образом, суммарная площадь водосбора сформировалась в 308.05 кв.км .

На рисунке 6 изображен типичный пример динамики поверхностных потоков воды, формирующихся в окрестности Крымска. Основная часть объема воды стекает в виде нескольких русловых потоков. Из-за обильных осадков ливневые потоки с гор формируют два основных потока, проходящих через ст.Неберджаевская и ст.Нижнебаканская, которые встречаются перед Крымском (в так называемом «бутылочном горлышке») и генерируют гидравлический скачок, распространяющийся в виде волны (цунами) высотой 7-10 м в направлении Крымска сметая все на своем пути [Барышников, 2007].



Рисунок 6- Характер распространения поверхностных вод в районе населенных пунктов Крымск, Армянский, Нижнебаканский и Неберджаевская

Результаты моделирования наглядно демонстрируют характерную особенность динамики поверхностных стоков выше г. Крымск и х.Армянский. Результаты моделирования наглядно показывают, что ливневые потоки с гор формируют два основных потока, проходящих через станции Неберджаевская и Нижнебаканская, которые встречаются перед Крымском (в так называемом «бутылочном горлышке») и генерируют гидравлический скачок, распространяющийся в виде волны (типа цунами) [Храпов, Писарев, 2012]. В зависимости от гидрологического режима в горах высота цунами может достигать нескольких метров, двигаясь в направлении Крымска. Аналогичные процессы происходят в окрестностях хутора Армянский.

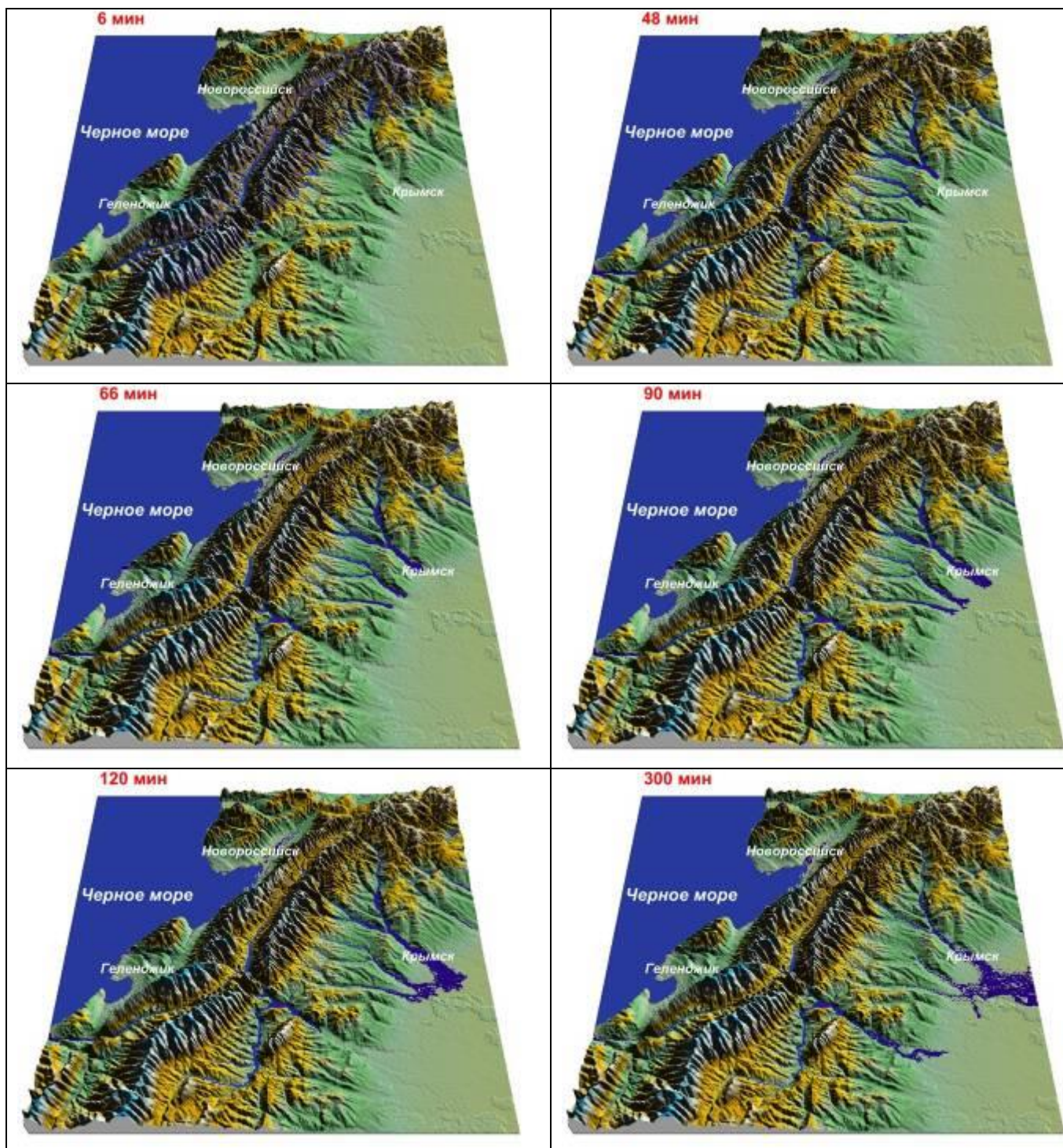


Рисунок 7 – Области затопления в различные моменты времени после начала ливневого паводка для $\sigma = 30 \text{ мм/ч}$, $\tau = 300 \text{ мин}$

Заключение

Программный комплекс «EcoGIS» позволяет решать задачи связанные с:

- прогнозированием последствий и развитие чрезвычайных ситуаций, таких как наводнение и засуха;
- проектированием гидротехнических сооружений с целью повышения эффективности их функционирования и уровня безопасности природно-хозяйственных систем;
- экспертизой существующих гидротехнических сооружений и дренажных коммуникаций в случае ЧС;
- определением оптимальных гидрологических режимов затопления пойменных территорий в случае регулируемого стока.

Отличительной особенностью программного комплекса «EcoGISSimulation» является учет большого числа физических факторов влияющих на динамику затопления территорий, а также использование современных численных методов, специально адаптированных, в частности, к уравнениям Сен-Венана, описывающих динамику поверхностных вод.

В программном комплексе реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура, позволяющая пользователю запускать множество расчетов со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах.

Разработанные различные варианты распараллеливания компьютерных моделей программного комплекса «EcoGIS-Simulation» с использованием стандартов OpenMP, MPI, CUDA позволят пользователю осуществлять выбор наиболее эффективной технологии параллельных(распределенных) вычислений в зависимости от конфигурации используемого вычислительного кластера и исходной постановки задачи.

Выявлены причины возникновения и прогноз затопления территории г. Крымска и его окрестности на основе компьютерного моделирования. Представлены результаты гидродинамического моделирования затопления территории Крымского района в период ливневого паводка 2012 г.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-07-97056 p_поволжье_a, 13-01-97062 p_поволжье_a, 13-05-97065 p_поволжье_a, РГНФ 13-01-12015.

Библиографический список

1. Барышников Н. Б. Динамика русловых потоков. СПб.изд. РГГМУ, 2007, 314 с
2. Бельчиков В.А., Борщ С.В., Мухин В.М., Полуниин А.Я. Опасные паводки в бассейне р. Кубань и методы их прогнозирования // 80 лет Гидрометцентру России / Сборник статей. Москва: ТРИАДА ЛТД, 2010, 401-422.
3. Васильев О.Ф., Создание систем оперативного прогнозирования половодий и паводков // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 3. С. 237-242.
4. Воронин А.А., Елисеева М.В., Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2012, № 3(19), С.54-62.
5. Катастрофический паводок в бассейне реки Адагум // отчет ЧС Центра «Антистихия» МЧС России, ФГБУ «ГГИ», ФГБУ «Краснодарский ЦГМС» и департамента Росгидромета по ЮФО и СКФО, 2012, стр. 42.
6. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. К определению параметров физико-математических моделей формирования речного стока при недостаточности гидрологических наблюдений //Метеорология и гидрология. 2005. № 12. С. 77-87.
7. Писарев А.В., Храпов С.С., Агафонникова Е.О., Хоперсков А.В. Численная модель динамики поверхностных вод в русле Волги: оценка коэффициента шероховатости // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки, 2013, N 1, с. 114-130.
8. Труды Гидрометцентра России, вып. 341 / Морские и речные гидрометеорологические прогнозы, 2006.
9. Хоперсков А.В., Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Елисеева М.В., Кобелев И.А. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Ч.1. Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка // Проблемы управления. 2012. № 5. С. 18-25.
10. Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Дьяконова Т.А., Циркова Е.А. Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2012. Т.16. 1. С. 43-47.
11. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Кузьмин Н.М., Писарев А.В., Кобелев И.А. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD-подхода // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. №1. С.282-297.
12. Храпов С.С., Хоперсков А.В., Еремин М.А. Компьютерное моделирование экологических систем: Монография. - Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2010, 123 с. ISBN 978-5-9669-0784-6.
13. Храпов С. С., Хоперсков А. В, Писарев А. В., Кобелев И. А., Геоинформационная система для прогноза сезонных затоплений // ИнтерКарто-ИнтерГИС 18 : материалы Международной конференции, Россия, Смоленск, 26-28 июня 2012. — 2012. — С. 386-394.
14. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Федотова З.И. Об использовании методов численного моделирования для оценки катастрофических воздействий длинных волн на прибрежную территорию // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - Москва: ВИНТИ. - 2007. - № 4. - С.104-113
15. Khrapov S.S., Pisarev A.V., Kobelev I.A., Zhumaliev A.G., Agafonnikova E.O., Losev A.G. and Khoperskov A.V. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage // Advances in Mechanical Engineering. Volume 2013, Article ID 787016, 11 pages.