Проблема прогноза и управления гидрологическим режимом на горной территории в период ливневого паводка на основе гидродинамических численных экспериментов

**Человек:** Объектом исследования являются математические модели и их численные реализации, предназначенные для описания нестационарных паводковых явлений. Кратко обсуждаются структура, интерфейс и вычислительные возможности программного комплекса "EcoGIS-Simulation-2.0", основанного на геоинформационных и суперкомпьютерных технологиях, для моделирования гидрологического режима паводковых явлений. Важнейшим фактором, определяющим качество результатов моделирования, представляется цифровая модель рельефа местности. Основное внимание в работе уделено исследованию гидрологической обстановки и возникшей чрезвычайной ситуации в 2012 года в районе г. Крымска, приведшего к массовой гибели людей. Построена цифровая модель рельефа для территории Крымского района Краснодарского края, позволяющая адекватно моделировать гидрологический режим в условиях сильного паводка с использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0". Программный комплекс позволяет учитывать все основные физические факторы, определяющие динамику затопления территории, использует численные алгоритмы, специально адаптированные для решения уравнений Сен-Венана. Реализованная двухзвенная клиент-серверная архитектура позволяет пользователю запускать несколько расчетов со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах. На основе проведенных численных экспериментах удалось воспроизвести динамику паводковой волны, способной привести к чрезвычайной ситуации 2012 года. Выявлен ряд особенностей гидрологического режима в период ливневого паводка 2012 г, связанных с ландшафтом и распределением осадков.

**Key words:** Вычислительные эксперименты, математическое моделирование, модель Сен-Венана, численные схемы, программное обеспечение, цифровая модель рельефа, графические ускорители, гидрологический режим, вычислительная гидродинамика, техносферная безопасность

=================================

**FastText\_KMeans\_Clean:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. Нежнебаканской (рис. 1). Главное окно приложения "EcoGIS-Simulation-2.0" содержит (рисунок 3):. Адагум перед г. Крымск равен 19.05 км2 (участок С ). Применены различные варианты распараллеливания компьютерных моделей в "EcoGIS-Simulation-2.0" с использованием стандартов OpenMP, MPI и CUDA, что позволяет пользователю осуществлять выбор наиболее эффективной технологии параллельных вычислений в зависимости от конфигурации используемого вычислительного кластера и исходной постановки задачи.

**Key words part:** 0.5666666666666667

=================================

**FastText\_KMeans\_Raw/:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. При разработке вычислительного комплекса использовались современные геоинформационные (построение цифровой модели рельефа и визуализация пространственно распределенных данных о гидрологическом режиме местности в различные моменты времени) и технологии параллельных вычислений, а также оригинальные эффективные алгоритмы расчета гидродинамических течений [22, 24]. Интерфейс "EcoGIS-Simulation-2.0". Рисунок 5 – Цифровая модель рельефа Крымского района.

**Key words part:** 0.6333333333333333

=================================

**FastText\_PageRank\_Clean/:** С 22 часов 6 июля по 03 часа 7 июля в бассейне р. Нежнебаканской (рис. 1). `{((delH)/(delt)+(delHu\_x)/(delx)+(delHu\_y)/(dely)=q), ((delu\_x)/(delt)+u\_x(delu\_x)/(delx)+u\_y(delu\_x)/(dely)=-g\*(deleta)/(delx)+f\_x), ((delu\_y)/(delt)+u\_x(delu\_y)/(delx)+u\_y(delu\_y)/(dely)=-g\*(deleta)/(dely)+f\_y):}` (1). Структура программного комплекса. Интерфейс "EcoGIS-Simulation-2.0". Площадь водосбора реки Баканка составила 179.1 км2 (участок А ), соответственно для реки Неберджайка водосбор составляет 109.9 км2 (участок В ), водосбор участка р. Неберджаевская и ст. Аналогичные процессы происходят выше хутора Армянский.

**Key words part:** 0.3333333333333333

=================================

**FastText\_PageRank\_Raw/:** С 22 часов 6 июля по 03 часа 7 июля в бассейне р. Нежнебаканской (рис. 1). `{((delH)/(delt)+(delHu\_x)/(delx)+(delHu\_y)/(dely)=q), ((delu\_x)/(delt)+u\_x(delu\_x)/(delx)+u\_y(delu\_x)/(dely)=-g\*(deleta)/(delx)+f\_x), ((delu\_y)/(delt)+u\_x(delu\_y)/(delx)+u\_y(delu\_y)/(dely)=-g\*(deleta)/(dely)+f\_y):}` (1). Структура программного комплекса. Интерфейс "EcoGIS-Simulation-2.0". Главное окно приложения "EcoGIS-Simulation-2.0" содержит (рисунок 3):. Неберджаевская и ст. Аналогичные процессы происходят выше хутора Армянский.

**Key words part:** 0.3333333333333333

=================================

**Mixed\_ML\_TR/:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. Нежнебаканской (рис. 1). При разработке вычислительного комплекса использовались современные геоинформационные (построение цифровой модели рельефа и визуализация пространственно распределенных данных о гидрологическом режиме местности в различные моменты времени) и технологии параллельных вычислений, а также оригинальные эффективные алгоритмы расчета гидродинамических течений [22, 24]. В программном комплексе реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура (рис. 2), что позволяет пользователю запускать несколько задач со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах. Главное окно приложения "EcoGIS-Simulation-2.0" содержит (рисунок 3):. В первом приближении примем `sigma=const` в течение промежутка времени `tau` , тем самым объем осадков определяется величиной `bbW=sigmatau` . Отличительной особенностью программного комплекса "EcoGIS-Simulation-2.0" является учет большого числа физических факторов, влияющих на динамику затопления территорий, а также использование современных численных методов, специально адаптированных для численного решения уравнений Сен-Венана, описывающих динамику поверхностных вод на сильно неоднородном рельефе. С использованием пакета программ "EcoGIS-Simulation-2.0" проведена серия численных экспериментов, моделирующих гидрологический режим с 6 на 7 июля 2012 на территории Крымского района Краснодарского края, с целью исследования причин возникновения катастрофических последствий.

**Key words part:** 0.7333333333333333

=================================

**MultiLingual\_KMeans/:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. Нежнебаканской (рис. 1). При разработке вычислительного комплекса использовались современные геоинформационные (построение цифровой модели рельефа и визуализация пространственно распределенных данных о гидрологическом режиме местности в различные моменты времени) и технологии параллельных вычислений, а также оригинальные эффективные алгоритмы расчета гидродинамических течений [22, 24]. В программном комплексе реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура (рис. 2), что позволяет пользователю запускать несколько задач со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах. Главное окно приложения "EcoGIS-Simulation-2.0" содержит (рисунок 3):. В первом приближении примем `sigma=const` в течение промежутка времени `tau` , тем самым объем осадков определяется величиной `bbW=sigmatau` .

**Key words part:** 0.6333333333333333

=================================

**Multilingual\_PageRank/:** С 22 часов 6 июля по 03 часа 7 июля в бассейне р. Нежнебаканской (рис. 1). Все это существенно уменьшило пропускную способность русла и поймы р. `{((delH)/(delt)+(delHu\_x)/(delx)+(delHu\_y)/(dely)=q), ((delu\_x)/(delt)+u\_x(delu\_x)/(delx)+u\_y(delu\_x)/(dely)=-g\*(deleta)/(delx)+f\_x), ((delu\_y)/(delt)+u\_x(delu\_y)/(delx)+u\_y(delu\_y)/(dely)=-g\*(deleta)/(dely)+f\_y):}` (1). В программном комплексе реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура (рис. 2), что позволяет пользователю запускать несколько задач со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах. Характерное время, затрачиваемое на один расчет с использованием C2070, составляет около 10 минут, что допускает составление прогнозов в режиме RealTime. Неберджаевская и ст. В пакете программ реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура, позволяющая пользователю запускать несколько расчетов со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах с использованием параллельных технологий на основе графических ускорителей.

**Key words part:** 0.5

=================================

**RuBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. Цифровая модель рельефа среди входных данных представляется важнейшим фактором, определяющим качество численной модели [23]. Применены различные варианты распараллеливания компьютерных моделей в "EcoGIS-Simulation-2.0" с использованием стандартов OpenMP, MPI и CUDA, что позволяет пользователю осуществлять выбор наиболее эффективной технологии параллельных вычислений в зависимости от конфигурации используемого вычислительного кластера и исходной постановки задачи. С использованием пакета программ "EcoGIS-Simulation-2.0" проведена серия численных экспериментов, моделирующих гидрологический режим с 6 на 7 июля 2012 на территории Крымского района Краснодарского края, с целью исследования причин возникновения катастрофических последствий.

**Key words part:** 0.7

=================================

**RuBERT\_KMeans\_With\_ST/:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. В материалах ФГБУ "ГГИ" [20] также приведены оценки максимальных расходов и объемов стока в период катастрофического паводка 6-7 июля 2012 г. в бассейне р. Результаты моделирования наглядно показывают, что ливневые потоки с гор формируют два основных потока, проходящих через станицы Неберджаевская и Нижнебаканская, которые встречаются перед Крымском (в так называемом "бутылочном горлышке") и генерируют гидравлический скачок, распространяющийся в виде волны (типа цунами). Применены различные варианты распараллеливания компьютерных моделей в "EcoGIS-Simulation-2.0" с использованием стандартов OpenMP, MPI и CUDA, что позволяет пользователю осуществлять выбор наиболее эффективной технологии параллельных вычислений в зависимости от конфигурации используемого вычислительного кластера и исходной постановки задачи.

**Key words part:** 0.5666666666666667

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** Нежнебаканской (рис. 1). Главное окно приложения "EcoGIS-Simulation-2.0" содержит (рисунок 3):. Результаты моделирования можно сохранить в виде GIF-анимации, файлов растровых изображений (PNG, JPG, GIF) и видео (AVI). Цифровая модель рельефа среди входных данных представляется важнейшим фактором, определяющим качество численной модели [23]. Неберджаевская и ст.

**Key words part:** 0.5

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** С 22 часов 6 июля по 03 часа 7 июля в бассейне р. Все это существенно уменьшило пропускную способность русла и поймы р. Структура программного комплекса. Неберджаевская и ст. Аналогичные процессы происходят выше хутора Армянский.

**Key words part:** 0.3333333333333333

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. Определено несколько факторов возникновения чрезвычайной ситуации. Одной из причин ЧС связывают с формированием 3-метрового водяного фронта по руслу р. `{((delH)/(delt)+(delHu\_x)/(delx)+(delHu\_y)/(dely)=q), ((delu\_x)/(delt)+u\_x(delu\_x)/(delx)+u\_y(delu\_x)/(dely)=-g\*(deleta)/(delx)+f\_x), ((delu\_y)/(delt)+u\_x(delu\_y)/(delx)+u\_y(delu\_y)/(dely)=-g\*(deleta)/(dely)+f\_y):}` (1). Важнейшим отличием комплекса программ "EcoGIS-Simulation-2.0" от версии "EcoGIS-Simulation-1.0" [39] является существенно более высокая скорость расчета динамики поверхностных вод на заданной территории. Рисунок 2 – Клиент-серверная структура программного комплекса "EcoGIS-Simulation-2.0". В пакете программ реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура, позволяющая пользователю запускать несколько расчетов со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах с использованием параллельных технологий на основе графических ускорителей.

**Key words part:** 0.5666666666666667

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_With\_ST/:** Адагум шел непрерывный ливень с интенсивностью 35–45 мм/ч, явившийся причиной катастрофического паводка и, как следствие, наводнения в г. Крымске и ст. Адагум из-за скачка расхода воды в силу особенностей конструкции нерегулируемого водосброса [28]. В данной работе развивается гидродинамический подход, позволяющий проследить изменения ситуации со временем и выявить физические механизмы формирования чрезвычайной ситуации, а также применим для исследования эколого-экономической системы на заданной территории [29, 30]. Рисунок 1 - Метеорологическая обстановка в районе Крымска с 6 по 7 июля 2012 года: карты космических съемок, часовые слои осадков, внизу – распределение осадков в Черноморском регионе [20, 21]. Важнейшим отличием комплекса программ "EcoGIS-Simulation-2.0" от версии "EcoGIS-Simulation-1.0" [39] является существенно более высокая скорость расчета динамики поверхностных вод на заданной территории. Пакет программ "EcoGIS-Simulation-2.0" состоит из трех основных компонентов (рис.2):. Применены различные варианты распараллеливания компьютерных моделей в "EcoGIS-Simulation-2.0" с использованием стандартов OpenMP, MPI и CUDA, что позволяет пользователю осуществлять выбор наиболее эффективной технологии параллельных вычислений в зависимости от конфигурации используемого вычислительного кластера и исходной постановки задачи.

**Key words part:** 0.43333333333333335

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** В ряде случаев возникает одновременное выполнение указанных условий [6]. Нежнебаканской (рис. 1). `{((delH)/(delt)+(delHu\_x)/(delx)+(delHu\_y)/(dely)=q), ((delu\_x)/(delt)+u\_x(delu\_x)/(delx)+u\_y(delu\_x)/(dely)=-g\*(deleta)/(delx)+f\_x), ((delu\_y)/(delt)+u\_x(delu\_y)/(delx)+u\_y(delu\_y)/(dely)=-g\*(deleta)/(dely)+f\_y):}` (1). Интерфейс "EcoGIS-Simulation-2.0". Аналогичные процессы происходят выше хутора Армянский.

**Key words part:** 0.3

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** В ряде случаев возникает одновременное выполнение указанных условий [6]. `{((delH)/(delt)+(delHu\_x)/(delx)+(delHu\_y)/(dely)=q), ((delu\_x)/(delt)+u\_x(delu\_x)/(delx)+u\_y(delu\_x)/(dely)=-g\*(deleta)/(delx)+f\_x), ((delu\_y)/(delt)+u\_x(delu\_y)/(delx)+u\_y(delu\_y)/(dely)=-g\*(deleta)/(dely)+f\_y):}` (1). Структура программного комплекса. Неберджаевская и ст. Аналогичные процессы происходят выше хутора Армянский.

**Key words part:** 0.3333333333333333

=================================

**Simple\_PageRank/:** За последние годы в качестве примеров ЧС можно указать на прорыв 150-метровой плотины ГЭС "Шакидор" на юго-западе Пакистана у города Пасни (февраль 2005, погибло 130 человек), прорыв плотины ГЭС "Кыадат" во Вьетнаме на реке Чу (октябрь 2007, затоплено около 5000 домов, 35 погибших), аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (2009), шламонакопителе ОАО "Аммофос" из-за просадки и прорыва дамбы (Вологодская область, май 2010, химические загрязнения отходами фосфорного производства), аварию на переливной плотине Саратовского оросительно-обводнительного канала (апрель 2010, причиной явились нагрузки при прохождении ледохода) [15], наводнение в Алтайском крае в мае - июне 2014 года [16], экстремальное половодье на нижнем Дунае в 2006 году из-за таяния больших запасов снега, очень теплой весны и обильных дождей [17], катастрофическое наводнение на Амуре летом 2013 года [18] и другие [19]. С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. В условиях сильной вертикальной зональности физико-географических характеристик многие авторы указывают на необходимость выделять прогнозы стока для горных рек в отдельную группу [35]. Прогнозы стоков для горных рек на основе стандартных гидрологических моделей имеют только статистический характер [36] Для горной территории или при наличии больших перепадов высот, приводящих к нестационарной картине, необходимо использовать методы прямого гидродинамического моделирования [22, 23, 37, 38]. Нижнебаканская, которые встречаются перед Крымском (в так называемом "бутылочном горлышке"), что приводит к формированию гидравлического скачка, распространяющегося в виде волны (цунами) высотой 7-10 м в направлении Крымска, который и привел к катастрофическим последствиям. Результаты моделирования наглядно показывают, что ливневые потоки с гор формируют два основных потока, проходящих через станицы Неберджаевская и Нижнебаканская, которые встречаются перед Крымском (в так называемом "бутылочном горлышке") и генерируют гидравлический скачок, распространяющийся в виде волны (типа цунами).

**Key words part:** 0.5333333333333333

=================================

**TextRank/:** С использованием программного пакета "EcoGIS-Simulation-2.0" для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. Программный вычислительный комплекс "EcoGIS-Simulation-2.0" позволяет на основе прямого гидродинамического моделирования в приближении мелкой воды и применения геоинформационных технологий:. При разработке вычислительного комплекса использовались современные геоинформационные (построение цифровой модели рельефа и визуализация пространственно распределенных данных о гидрологическом режиме местности в различные моменты времени) и технологии параллельных вычислений, а также оригинальные эффективные алгоритмы расчета гидродинамических течений [22, 24]. Отличительной особенностью программного комплекса "EcoGIS-Simulation-2.0" является учет большого числа физических факторов, влияющих на динамику затопления территорий, а также использование современных численных методов, специально адаптированных для численного решения уравнений Сен-Венана, описывающих динамику поверхностных вод на сильно неоднородном рельефе. С использованием пакета программ "EcoGIS-Simulation-2.0" проведена серия численных экспериментов, моделирующих гидрологический режим с 6 на 7 июля 2012 на территории Крымского района Краснодарского края, с целью исследования причин возникновения катастрофических последствий. Выявлены причины возникновения и прогноз затопления территории г. Крымска и его окрестности на основе компьютерного моделирования.

**Key words part:** 0.7333333333333333

=================================

**TF-IDF\_KMeans/:** Адагум, приведя к сильному повышению уровня воды во время ливневого паводка и затоплению территории города Крымск. Рисунок 2 – Клиент-серверная структура программного комплекса "EcoGIS-Simulation-2.0". На рисунке 5 изображена цифровая модель Крымского района и его окрестностей. Результаты численного моделирования наглядно демонстрируют характерную особенность динамики поверхностных потоков выше г. Крымск и х. Результаты моделирования наглядно показывают, что ливневые потоки с гор формируют два основных потока, проходящих через станицы Неберджаевская и Нижнебаканская, которые встречаются перед Крымском (в так называемом "бутылочном горлышке") и генерируют гидравлический скачок, распространяющийся в виде волны (типа цунами).

**Key words part:** 0.5

=================================

**Текст:** В ряде случаев возникает одновременное выполнение указанных условий [6]. За последние годы в качестве примеров ЧС можно указать на прорыв 150-метровой плотины ГЭС «Шакидор» на юго-западе Пакистана у города Пасни (февраль 2005, погибло 130 человек), прорыв плотины ГЭС «Кыадат» во Вьетнаме на реке Чу (октябрь 2007, затоплено около 5000 домов, 35 погибших), аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (2009), шламонакопителе ОАО «Аммофос» из-за просадки и прорыва дамбы (Вологодская область, май 2010, химические загрязнения отходами фосфорного производства), аварию на переливной плотине Саратовского оросительно-обводнительного канала (апрель 2010, причиной явились нагрузки при прохождении ледохода) [15], наводнение в Алтайском крае в мае - июне 2014 года [16], экстремальное половодье на нижнем Дунае в 2006 году из-за таяния больших запасов снега, очень теплой весны и обильных дождей [17], катастрофическое наводнение на Амуре летом 2013 года [18] и другие [19].. С использованием программного пакета «EcoGIS-Simulation-2.0» для прямого гидродинамического моделирования на заданном цифровом рельефе местности (ЦМР) в данной работе изучена динамика поверхностных вод на территории Крымского района и прилегающих горных территориях Краснодарского края с целью выявления некоторые особенностей распространения паводковых вод в условиях ЧС в ночь с 6-го на 7-ое июля 2012 года [6, 20, 21]. Используемая численная модель применялась для исследования гидрологического режима Волго-Ахтубинской поймы [22, 23, 24], моделирования газодинамических течений [25]. Определено несколько факторов возникновения чрезвычайной ситуации. Официальные результаты расследования в качестве главной причины катастрофического наводнения 2012 г. в Крымском районе указывают на чрезвычайно интенсивные ливневые осадки, ранее не наблюдавшиеся в этом регионе [20, 21]. С 22 часов 6 июля по 03 часа 7 июля в бассейне р. Адагум шел непрерывный ливень с интенсивностью 35–45 мм/ч, явившийся причиной катастрофического паводка и, как следствие, наводнения в г. Крымске и ст. Нежнебаканской (рис. 1). По данным метеостанций Крымска и Новороссийска общее количество осадков за 5 часов составило 124 мм и 157 мм соответственно.. Помимо аномальных метеоусловий решающую роль в затоплении г. Крымска сыграли антропогенные факторы [20]:. Все это существенно уменьшило пропускную способность русла и поймы р. Адагум, приведя к сильному повышению уровня воды во время ливневого паводка и затоплению территории города Крымск. По данным ФГБУ «ГГИ» можно выделить следующие ключевые моменты затопления территории Крымска [20]:. В материалах ФГБУ «ГГИ» [20] также приведены оценки максимальных расходов и объемов стока в период катастрофического паводка 6-7 июля 2012 г. в бассейне р. Адагум:. Одной из причин ЧС связывают с формированием 3-метрового водяного фронта по руслу р. Адагум из-за скачка расхода воды в силу особенностей конструкции нерегулируемого водосброса [28].. Модели затопления Крымска на основе фотограмметрических методов с использованием геоинформационных технологий позволяют оценить площади затоплений [5, 10]. В данной работе развивается гидродинамический подход, позволяющий проследить изменения ситуации со временем и выявить физические механизмы формирования чрезвычайной ситуации, а также применим для исследования эколого-экономической системы на заданной территории [29, 30].. . Рисунок 1 - Метеорологическая обстановка в районе Крымска с 6 по 7 июля 2012 года: карты космических съемок, часовые слои осадков, внизу – распределение осадков в Черноморском регионе [20, 21]. Для анализа гидрологического режима территории в результате выпадения сильных осадков часто используются геоинформационные и полуаналитические методы расчета затопленной территории [4, 10, 31, 32]. Отметим физико-статистический и графоаналитический методы [33] с учетом особенностей при прогнозировании дождевых паводков [34]. В условиях сильной вертикальной зональности физико-географических характеристик многие авторы указывают на необходимость выделять прогнозы стока для горных рек в отдельную группу [35]. Прогнозы стоков для горных рек на основе стандартных гидрологических моделей имеют только статистический характер [36] Для горной территории или при наличии больших перепадов высот, приводящих к нестационарной картине, необходимо использовать методы прямого гидродинамического моделирования [22, 23, 37, 38].. Вычислительные эксперименты проводились с использованием пакета программ «EcoGIS-Simulation-2.0» [37, 38, 39,]. В программном комплексе численно реализована математическая модель динамики поверхностных вод основанная на системе уравнений Сен-Венана:. `{((delH)/(delt)+(delHu\_x)/(delx)+(delHu\_y)/(dely)=q), ((delu\_x)/(delt)+u\_x(delu\_x)/(delx)+u\_y(delu\_x)/(dely)=-g\*(deleta)/(delx)+f\_x), ((delu\_y)/(delt)+u\_x(delu\_y)/(delx)+u\_y(delu\_y)/(dely)=-g\*(deleta)/(dely)+f\_y):}` (1). где `H (x,y,t) -` толщина слоя воды, `u\_x (x,y,t), u\_y (x,y,t) -` горизонтальные компоненты скорости, усредненных по вертикальной координате, `eta -`определяет свободную поверхность воды, `f\_x,f\_y -` соответствующие горизонтальные компоненты вектора `sff` сил, действующих на вертикально усредненный слой жидкости [14].. Программный вычислительный комплекс «EcoGIS-Simulation-2.0» позволяет на основе прямого гидродинамического моделирования в приближении мелкой воды и применения геоинформационных технологий:. Важнейшим отличием комплекса программ «EcoGIS-Simulation-2.0» от версии «EcoGIS-Simulation-1.0» [39] является существенно более высокая скорость расчета динамики поверхностных вод на заданной территории. При разработке вычислительного комплекса использовались современные геоинформационные (построение цифровой модели рельефа и визуализация пространственно распределенных данных о гидрологическом режиме местности в различные моменты времени) и технологии параллельных вычислений, а также оригинальные эффективные алгоритмы расчета гидродинамических течений [22, 24].. . Рисунок 2 – Клиент-серверная структура программного комплекса «EcoGIS-Simulation-2.0». Структура программного комплекса. Пакет программ «EcoGIS-Simulation-2.0» состоит из трех основных компонентов (рис.2):. В программном комплексе реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура (рис. 2), что позволяет пользователю запускать несколько задач со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах. Управляющий модуль «MainPC» и модуль визуализации «MainVisual» [39] составляют ядро специализированной геоинформационной системы «EcoGIS-Simulation-2.0» [40, 41], 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.. Интерфейс «EcoGIS-Simulation-2.0». Главное окно приложения «EcoGIS-Simulation-2.0» содержит (рисунок 3):. . Рисунок 3 – Интерфейс внутренней геоинформационной системы « EcoGIS ». Процедура компьютерного моделирования динамики затопления территории в «EcoGIS-Simulation-2.0» состоит из следующих последовательных этапов:. . Рисунок 4 – Окно модуля для двумерной визуализации состояния гидрологического режима на фоне ЦМР. В модуле визуализации можно осуществлять построение: одномерных срезов вдоль заданной на карте местности произвольной прямой; трехмерных поверхностей рельефа и уровней воды [42, 43]. Результаты моделирования можно сохранить в виде GIF-анимации, файлов растровых изображений (PNG, JPG, GIF) и видео (AVI).. . . Моделирование гидрологической обстановки проводилось на гибридном суперкомпьютере с ускорителями на основе графических процессоров NVIDIA TESLA (TESLA K40 и С2070) с использованием параллельных программных модулей по стандартам MPI-OpenMP-CUDA. Характерное время, затрачиваемое на один расчет с использованием C2070, составляет около 10 минут, что допускает составление прогнозов в режиме RealTime.. . Рисунок 5 – Цифровая модель рельефа Крымского района. Цифровая модель рельефа среди входных данных представляется важнейшим фактором, определяющим качество численной модели [23]. На рисунке 5 изображена цифровая модель Крымского района и его окрестностей. Красная штриховая линия показывает используемую в модели границу области задания осадков ливневого характера с интенсивностью `Sigma` . В первом приближении примем `sigma=const` в течение промежутка времени `tau` , тем самым объем осадков определяется величиной `bbW=sigmatau` . В серии моделей варьировались значения параметров `sigma` и `bbW` [44]. Участки А, B , С показывают основные области водосбора. Площадь водосбора реки Баканка составила 179.1 км2 (участок А ), соответственно для реки Неберджайка водосбор составляет 109.9 км2 (участок В ), водосбор участка р. Адагум перед г. Крымск равен 19.05 км2 (участок С ).. На рисунке 6 изображена схема формирования основных потоков поверхностных потоков воды, формирующихся в окрестности Крымска, построенная по результатам серии численных расчетов. 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»), что приводит к формированию гидравлического скачка, распространяющегося в виде волны (цунами) высотой 7-10 м в направлении Крымска, который и привел к катастрофическим последствиям.. . Ри c унок 6. Схема динамики поверхностных вод в районе населенных пунктов Крымск, Армянский, Нижебаканский и Небержаевская по результатам численных экспериментов. Результаты численного моделирования наглядно демонстрируют характерную особенность динамики поверхностных потоков выше г. Крымск и х. Армянский (рис. 7). Результаты моделирования наглядно показывают, что ливневые потоки с гор формируют два основных потока, проходящих через станицы Неберджаевская и Нижнебаканская, которые встречаются перед Крымском (в так называемом «бутылочном горлышке») и генерируют гидравлический скачок, распространяющийся в виде волны (типа цунами). В зависимости от гидрологического режима в горах высота цунами может достигать нескольких метров, двигаясь в направлении Крымска. Аналогичные процессы происходят выше хутора Армянский.. . Рисунок 7 – Области затопления в различные моменты времени после начала ливневого паводка для значений параметров `sigma` = 30 мм/ч, `tau` = 300 мин. Отличительной особенностью программного комплекса «EcoGIS-Simulation-2.0» является учет большого числа физических факторов, влияющих на динамику затопления территорий, а также использование современных численных методов, специально адаптированных для численного решения уравнений Сен-Венана, описывающих динамику поверхностных вод на сильно неоднородном рельефе. В пакете программ реализована двухзвенная клиент-серверная архитектура, позволяющая пользователю запускать несколько расчетов со своей клиентской машины на удаленных вычислительных кластерах с использованием параллельных технологий на основе графических ускорителей. Применены различные варианты распараллеливания компьютерных моделей в «EcoGIS-Simulation-2.0» с использованием стандартов OpenMP, MPI и CUDA, что позволяет пользователю осуществлять выбор наиболее эффективной технологии параллельных вычислений в зависимости от конфигурации используемого вычислительного кластера и исходной постановки задачи.. С использованием пакета программ «EcoGIS-Simulation-2.0» проведена серия численных экспериментов, моделирующих гидрологический режим с 6 на 7 июля 2012 на территории Крымского района Краснодарского края, с целью исследования причин возникновения катастрофических последствий. Выявлены причины возникновения и прогноз затопления территории г. Крымска и его окрестности на основе компьютерного моделирования. Представлены предварительные результаты гидродинамического моделирования затопления территории Крымского района в период ливневого паводка 2012 г.