

УДК 519.876.5

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАВОДКАМИ В РЕЧНЫХ СЕТЯХ

К.Е. Дубинко

Волгоградский государственный университет
Россия, 400062, Волгоград, Университетский проспект, 100
E-mail: horseunnamed@gmail.com

А.А. Воронин

Волгоградский государственный университет
Россия, 400062, Волгоград, Университетский проспект, 100
E-mail: voronin.prof@gmail.com

Ключевые слова: системная динамика, имитационное моделирование, управление паводками.

Аннотация: Предложен подход к поиску оптимальных проектов управления затоплением речных сетей на основе использования модели распространения объемов воды на территориях русел, построенной по методу системной динамики. Подход предполагает тесное взаимодействие между описанной в данной статье моделью системной динамики и уже реализованной моделью гидродинамического затопления территории речных сетей, входящей в состав программного комплекса ЭКОГИС. Для идентификации модели системной динамики используются методы машинного обучения.

1. Введение

Рассмотрим пойменные территории речных сетей. Регулярные режимы паводка формируют устойчивые экологические условия, благодаря которым формируются разнообразные, а зачастую уникальные экосистемы. Такие антропогенные факторы, как установка гидросооружений, постройка хозяйственных объектов и другие способы эксплуатации пойменных территорий вносят изменения в естественный ритм затопления и приводят к деградации сложившихся за долгое время природных условий. Примером является территория Волго-Ахтубинской поймы (ВАП). В [1] рассматривается негативное влияние Волжской ГЭС, регулирующей сброс паводковых вод, на экосистему ВАП. Отмечается, что для предотвращения деградации и улучшения ситуации требуется система регулирующих сооружений, обеспечивающих реализацию экологических требований к водообмену речной сети ВАП. Одним из возможных способов регуляции водных потоков и затоплений является установка дамб в сечениях русел.

В рамках работ по гидродинамическому моделированию был разработан программный комплекс ЭКОГИС для расчета цифровых карт затопления [2]. Возможности ЭКОГИС позволяют изучать модель естественного затопления речных сетей, имитировать изменения в режиме паводка и рельефе, получать данные для построения и вери-

фикации гидротехнических проектов управления паводками. Но в силу высокой вычислительной сложности гидродинамического расчета карт затопления в приемлемом по точности масштабе и наличия большого количества альтернатив для проектов, появляется необходимость для построения быстрых методов поиска конфигураций эффективного управления. С этой целью была построена модель системной динамики, направленная на прогнозирование экологического ущерба при фиксированном стационарном управлении, которое реализует проект.

2. Описание моделируемой системы

Определим параметры системы, состоящей из речной сети и источника объемов русловых вод. Внутренним параметром речной сети, задающей ее структуру, является карта рельефа территории. Ее изменения могут имитировать установку дамб в сечениях русел. Внешним параметром является гидрограф источника (Q). Ценность затопления территории русел определяется кадастровым типом ее участков и картой индексов экологической ценности [3].

Общая постановка задачи управления заключается в оптимальном изменении рельефа путем установки на нем управляемых дамб, обеспечивающих наибольшее приращение экологической полезности с учетом затрат на реализацию проекта управления. Проектом управления является установка конфигурации из определенного количества дамб, системно реализующих алгоритмы перераспределения объемов вод русловой системы. Стоит учитывать, что конфигурация выбирается на неопределенное количество лет и не должна быть привязана к гидрографу конкретного паводка. Таким образом, общая постановка распадается на задачу поиска оптимального плана размещения дамб (конфигурации) и задачу дальнейшего управления фиксированной конфигурацией для ожидаемых паводков.

В контексте соотношения «затраты-эффект» ставится задача поиска области параметров, в которой управление будет обладать наибольшей чувствительностью. Заметим, что экологический эффект неуправляемого затопления естественно увеличивается с ростом параметра Q , снижая потребность в затратах на управление. А так как увеличение экологического эффекта от управления обеспечивается за счет перераспределения объемов, то при достаточно малых Q ожидаемый эффект будет становиться несущественным относительно затрат. Поэтому задачи поиска конфигурации дамб и их управления должны решаться в области гидрографов с определенным уровнем потенциального эффекта. Для этого следует построить метод оценивания перспективности управления на множестве гидрографов, характерных для рассматриваемой речной сети. На данном этапе исследования таким методом является вычисление разности между картами затопления с близкими внешними параметрами. Пример такой карты приведен на рис. 1. Большая разность при малых изменениях гидрографа говорит о потенциальной чувствительности затопления к изменениям гидрологического режима. В том числе, рельефа.

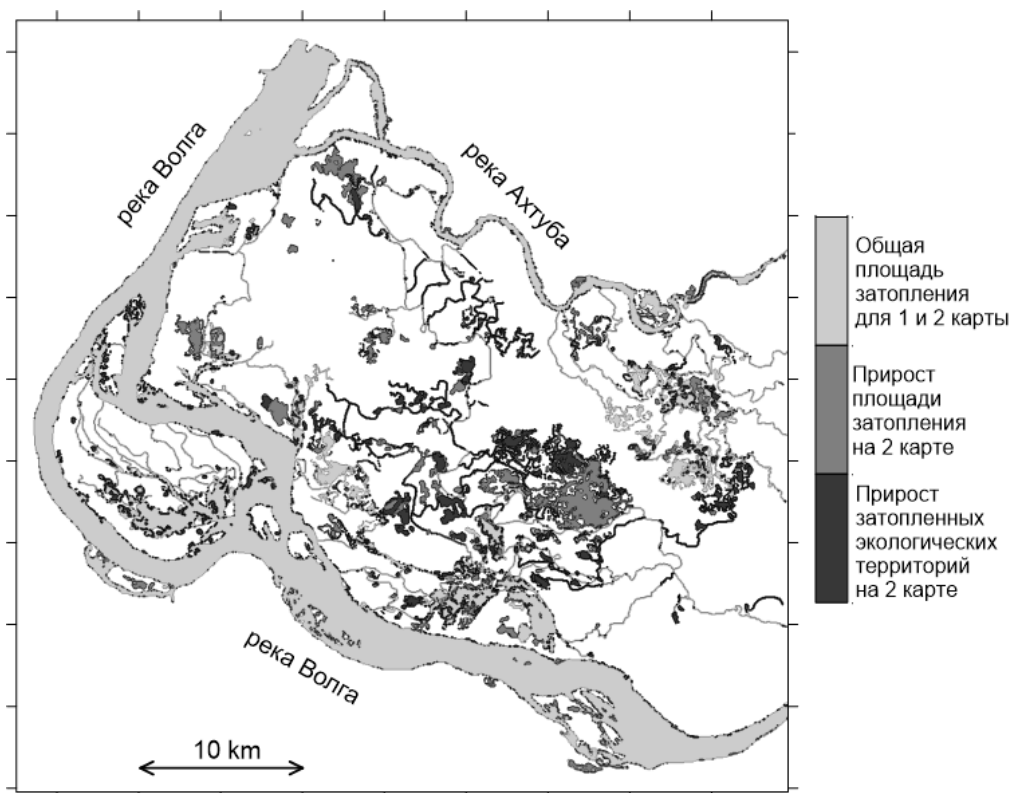


Рис. 1. Разность карт затопления ВАП, посчитанных через гидродинамическую модель ЭКОГИС при изменении интенсивности сброса воды.

Рассмотрим структуру и связи русел, формирующих речную сеть. С каждым руслом связана область территории, которая подвергается затоплению из данного русла на всех возможных состояниях неуправляемой системы с фиксированными внешними параметрами. На таких областях формируется целевая функция экологической полезности затопления, которая зависит от площади затопленной экологических ячеек карты индексов. Области затопления русел могут пересекаться, формируя зоны, в которых затопляемая территория связана с несколькими руслами. Но наибольший интерес в рамках задачи управления представляет разбиение русловой структуры на зоны независимого управления, которые можно выделить в отдельные объекты системы со своими внутренними параметрами и взаимосвязями. Поиск таких зон осуществляется алгоритмом зонирования на основе карт затопления [4]. Пример работы алгоритма зонирования представлен на рис. 2. Критерием независимости затопления смежных зон является отсутствие (в рамках погрешности) перехода воды через их общую границу. Учитывается относительный объем, проходящий через границу и доля затопленных ячеек границы.

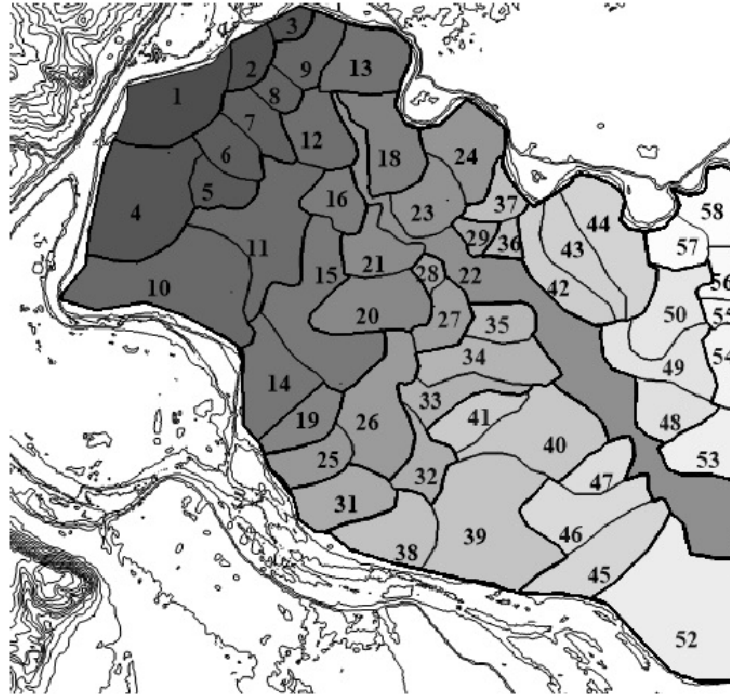


Рис. 2. Разделение территории северной части ВАП на множество независимо затопляемых зон.

3. Модель системной динамики распределения объемов в русловой сети

Воспользуемся обозначениями, принятыми для построения моделей системной динамики в [5]. Тогда модель баланса воды в зонах описывается уравнениями:

$$V[i].K = V.J - TF[i].JK + DT(\sum T[prev(i)]to[i].JK - \sum T[i]to[next(i)].JK)$$

$$VF[i].K = VF[i].J + TF[i].JK - l_i(VF[i].J)$$

$$P[i].K = \phi_i(VF[i].J)$$

$$TF[i].KL = f_i(V[i].K, VF[i].K, \bar{U}_i)$$

$$T[i]to[j].KL = g_{ij}(V[i].K, VF[i], VF[j], U_{ij})$$

Здесь описан переход состояния системы из момента времени J в прошлом в текущий момент времени K с последующим моментом L . DT – шаг модельного времени. $V[i]$ – уровень подвижного объема воды (суммарный объем в руслах зоны i). $VF[i]$ – уровень объема воды, выходящей за пределы русла, то есть объем затопления территории. $P[i]$ – значение целевой функции затопления зоны. Через $T[i]to[j]$ обозначен темп перехода воды из зоны i в смежную зону j , при этом $prev(i), next(i)$ – номера зон, предшествующих и следующих за зоной i по направлению течения русел.

В уравнениях присутствуют функции, которые могут быть восстановлены по данным, полученным через прямое гидродинамическое моделирование в пределах границ зоны. $f(V, VF, \bar{U})$ описывает потери потока, проходящего через зону. Значение этой функции является темпом накопления уровня затопления. f зависит от текущего потока в русловой структуре зоны, затопления и вектора управлений дамбами в рассматриваемой зоне. Выбор зависимости обусловлен постепенным замедлением затопления территории зоны, а также прямым влиянием количества воды, проходящем в данный момент через зону, и установленным уровнем дамб. Затопление имеет потери, связанные с впи-

тиванием воды в почву. Потери объема затопления выражаются функцией $l(VF)$. Функция $g_{ij}(V_i, VF_i, VF_j, U_{ij})$ это функция принятия решений о переходе объема воды между смежными зонами вдоль течения, которая зависит от текущего потока течения, накопленных объемов воды в обеих зонах и управления между ними. $\phi(VF)$ является целевой функцией затопления.

В модели имеются внешние зоны через которые регулируется подача воды в систему. Темпы таких зон задаются в соответствии с гидрографом источников объема. Эти зоны могут не иметь прямого «отражения» на ЦМР и собственных уровней системной динамики, так как существенными для таких зон являются только темпы внешней подачи объема воды. Начальные данные для уровней остальных зон могут быть считаны с некоторой стартовой карты затопления без течения (для которой темпы обмена воды между зонами являются нулевыми).

4. Оптимизация управления на основе модели системной динамики

Низкая вычислительная сложность модели системной динамики позволяет рассчитывать эффект управления дамбами на очень большом множестве возможных значений. При большом шаге дискретизации возможных значений открытости каждой дамбы и малом количестве русловых взаимосвязей между зонами возможен переборный поиск оптимального проекта. Иначе применяется генетический алгоритм поиска, который заключается в случайной генерации множества потенциальных проектов (векторов константных управлений) и его последовательном случайном улучшении. На каждом шаге такого алгоритма отбрасываются варианты с наихудшей оценкой модельного эффекта, а их место занимают проекты, полученные случайным изменением компонент оставшихся проектов. При появлении достаточно эффективного проекта происходит его тестирование на гидродинамической модели. Если результаты гидродинамической модели значительно отличаются от результатов модели системной динамики, следует уточнить данные о неизвестных зависимостях.

Для восстановления неизвестных зависимостей в уравнениях модели системной динамики могут быть применены регрессионные модели. Обучение регрессионных моделей происходит на основе данных, полученных при прямом гидродинамическом моделировании. Причем сбор данных для отдельных зон может быть реализован независимыми запусками гидродинамической модели на локальной территории зон, что существенно экономит время расчетов по сравнению с прогоном гидродинамической модели по всей территории речной сети. Для сбора первичной информации проводятся предварительные испытания гидродинамической модели на сетке параметров неизвестных функций для каждой зоны. Стоит отметить, что достаточно запустить расчет гидродинамической модели на промежуток времени, соответствующий шагу времени модели системной динамики, а не на весь период затопления. Проекты, найденные во время поиска оптимальной конфигурации, автоматически тестируются на гидродинамической модели. Каждое такое тестирование воспроизводит новые карты затопления, которые обучают регрессионные модели в рамках модели системной динамики для следующего запуска алгоритма оптимизации.

Таким образом, построен непрерывный цикл автоматического взаимодействия высокоточной гидродинамической модели и модели системной динамики, которая составляет приблизительный прогноз значимых для исходной задачи значений. В дальнейшем модель системной динамики может быть расширена для исследования неста-

ционных управлений, а в дополнение к задаче поиска проекта может быть поставлена задача рассмотрения оптимальной траектории развития проекта путем поэтапного изменения конфигурации.

Список литературы

1. Болгов М.В., Шаталова К.Ю., Горелиц О.В., Землянов И.В. Водно-экологические проблемы Волго-Ахтубинской поймы // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1, № 2. С. 15-37.
2. Программный комплекс ЭКОГИС. <http://www.geomit.ru/ecogis>.
3. Воронин А.А., Гребенюк С.Е. Модель оценки ущерба в слабоустойчивых социоприродохозяйственных системах // Управление большими системами (УБС '2016): материалы XIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых / Под ред. Новикова Д.А., Засканова В.Г. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Самарский университет, 2016. С. 300-311.
4. Воронин А.А., Васильченко А.А., Дубинко К.Е., Исаева И.И. Программный комплекс для имитационного моделирования гидротехнических проектов на пойменных территориях // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2018. Т. 21, № 2. С. 59-74.
5. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятий / Пер. с англ. Д.М. Гвишиани. М.: Прогресс, 1971.