

М.В. Шмакова, И.Н. Липовицкая

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

M.V. Shmakova, I.N. Lipovitskaya

QUESTIONS OF MATHEMATICAL MODELING OF CHANNEL DEFORMATION

Математическое моделирование русловых деформаций может быть представлено модельной системой «Основные метеорологические элементы — Формирование твердого и жидкого стока на водосборе — Движение потока воды и твердого вещества в русле — Русловые деформации». При этом современные математические модели речных потоков должны характеризоваться физически обоснованным описанием взаимодействия речного потока и дна и взаимосвязанным расчетом переменных состояния потока воды и твердого вещества в русле.

Ключевые слова: русловые процессы, математические модели, речной поток, прогноз русловых деформаций.

Mathematical modeling of channel deformations may be presented model system «Basis meteorological elements — Formation of the liquid and solid runoff at the watershed — Movement water and solid flows in the channel — Channel deformation». Modern hydrodynamic models must meet the basic requirements: 1. physically reasonable description of the interaction of the river flow and the bottom; 2. interrelated calculation of state variables of water flow and the solid in the channel.

Key words: channel processes, mathematical models, a river flow, forecast of channel deformations.

Введение

Русловые деформации — следствие сложного многофакторного процесса формирования жидкого и твердого стока в речном бассейне и его дальнейшей динамики в русле водотока. В 1897 г. В.М. Лохтин выделил основные факторы, определяющие развитие реки: водность, ландшафтные характеристики и степень размываемости ложа реки. Если заметить, что водность реки является функцией климата, то в основу крупномасштабного моделирования русловых деформаций должен быть положен комплекс климатических, геоморфологических и гидродинамических моделей. В 1938 г. М.А. Великанов уточнил подход В.М. Лохтина, четко выделив три определяющих развитие реки фактора: климат, рельеф и геологическое строение.

Актуальность прогнозов русловых деформаций обусловлена, прежде всего, нуждами строительного проектирования, а заблаговременность прогнозов определяется «временем полного генетического цикла развития русловой формы или явления на определенном структурном уровне» [10]. Для крупномасштабных русловых процессов,

таких как полный цикл развития макроформ, развитие занимает как отдельные годы, так и десятки и сотни лет и в этом случае можно говорить о долгосрочных прогнозах русловых деформаций. Для достаточно протяженных по времени русловых деформаций традиционные методы прогнозов, ориентированные на законы развития русловых процессов, могут оказаться несостоятельными по причине того, что эти методы построены на обобщенной наблюдательной базе и обозначают лишь тенденции развития, не учитывая факторы (например, климат), влияние которых прослеживается лишь за достаточно продолжительный период времени.

Также следует заметить, что в результате проведения различных гидротехнических мероприятий на водотоках, последние находятся под воздействием этих мероприятий. «Поэтому использование для таких водных объектов традиционных подходов, основанных на применении гидроморфологических методов исследования и гидроморфологических зависимостей, в некоторых случаях не позволяет получить надежные результаты прогнозирования» [11]. Из этого следует, что математическое моделирование русловых деформаций остается единственно возможным инструментом оценки динамики русловых форм.

Таким образом, при расчете долговременных русловых деформаций необходимо учитывать климатические, геоморфологические характеристики водосбора, гидродинамические и гидроморфологические характеристики водотока, а также внутригодичное распределение стока. Количественную оценку переформирования дна и берегов водотоков можно представить модельной системой «Основные метеорологические элементы — Формирование твердого и жидкого стока на водосборе — Движение потока воды и твердого вещества в русле — Русловые деформации» (рис. 1).

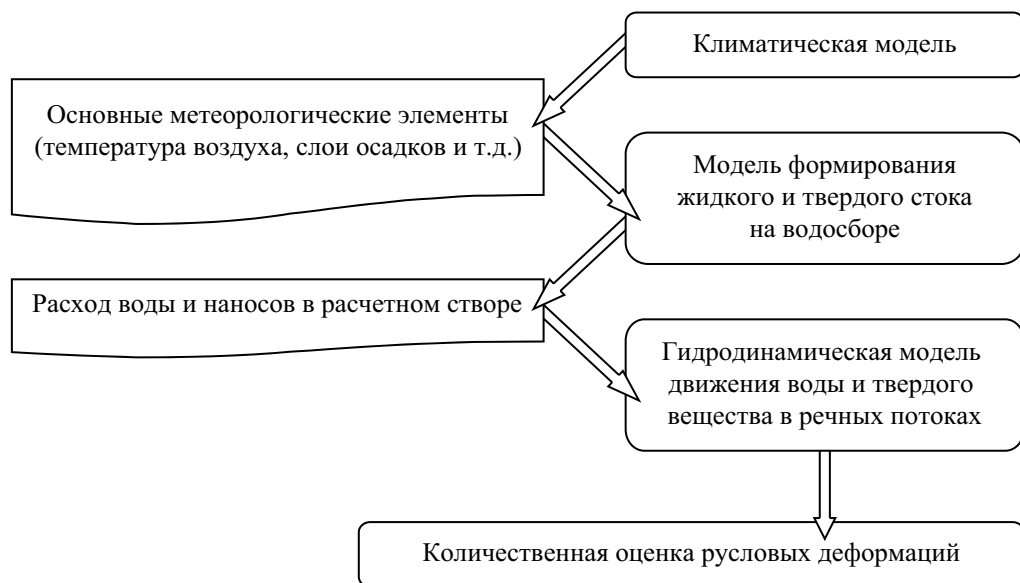


Рис. 1. Основные этапы математического моделирования русловых деформаций

Исходя из этого, математическое моделирование русловых деформаций должно быть определено следующими основными положениями:

- Комплексное использование климатических, геоморфологических и гидродинамических математических моделей.
- Учет внутригодового распределения основных факторов, определяющих русловые процессы.
- Взаимосвязанный расчет переменных состояния потока воды и твердого вещества в русле в гидродинамических моделях.

Рассмотрим основные элементы модельной системы.

Климатические модели

При моделировании русловых деформаций безусловный интерес представляют прежде всего именно долгосрочные прогнозы поведения климатической системы, так называемые сценарии изменения климата. Сценарии изменения климата описывают возможные изменения климатического фона по отношению к выбранному периоду. Эти изменения могут быть вызваны естественными внутренними процессами или внешними воздействиями, а также устойчивыми изменениями антропогенного происхождения в составе атмосферы [8].

Основными характеристиками современных изменений климата являются средняя глобальная температура воздуха (средняя годовая осредненная для всей планеты или температура приземного слоя воздуха для отдельных регионов) и годовой слой осадков (для планеты в целом или для отдельных регионов).

Можно выделить два независимых подхода для оценки возможных региональных изменений режима увлажнения и температуры воздуха [7]:

1. Теоретический, основанный на моделях общей циркуляции атмосферы (например, GFDL89, ECHAM1-A, UKTR). Результаты вычисления по таким моделям имеют месячное разрешение по времени и могут быть обобщены для года.
2. Эмпирический, основанный на данных о современных трендах для обширных территорий и палеоклиматических реконструкциях для теплых и холодных эпох прошлого. Решения по палеоклиматическим моделям представлены, как правило, годовыми слоями осадков и сезонными аномалиями температуры воздуха.

Для оценки возможных изменений основных климатических характеристик необходимо выбрать наиболее физически обоснованный и адекватный сценарий. Критерием надежности выбранного сценария является соответствие воспроизведенного по климатической модели современного климата и его фактическими характеристиками, полученными на основании данных наблюдений.

Математические модели формирования жидкого и твердого стока на водосборе

Формирование стока на водосборе — процесс комплексный, обусловленный множеством причин. Существует большое количество математических моделей,

описывающих формирование стока на водосборе как непрерывно в течение года, так и только в период снеготаяния или период выпадения осадков [1, 5, 6]. Исходными данными для таких моделей являются стандартные данные метеорологических наблюдений, результатом расчета по моделям — величины стока воды и наносов в расчетном створе. Шаг по времени для расчета в таких математических моделях меняется от минут до года. Очевидно, что чем меньше временной масштаб математической модели, тем должны быть выше точность переменных состояния модели и ее параметров.

В математическом моделировании русловых деформаций важно учитывать сезонные климатические изменения, которые влияют на изменение характеристик речного потока. Например, при свободном меандрировании «глубинные деформации в пределах фиксированных плановых очертаний русла носят сезонный характер и сводятся к нарастанию перекаатов и размыву плесов в период половодья и к противоположным деформациям в период межени» [2]. Для ленточногрядового, побочневого и осередкового типов русловых процессов характерны размыв перекаатов в период межени и намыв в период половодья. Противоположная картина наблюдается для плесовых участков русла — размыв в период половодья и намыв в меженный период [2].

Таким образом, выбор модели формирования стока определяется ее шагом по времени и балансовые модели с годовым шагом не подходят. Среднемесячные расходы воды также не позволяют учитывать динамику этих величин внутри сезона. Возможно, для долговременных расчетов деформаций русла представляется целесообразным использование данных о величинах суточных расходов воды и твердого вещества с поверхности водосбора, несмотря на то, что для получения суточных расходов воды требуется значительный объем информации о характеристиках водосбора и переменных состояния модели.

Математические модели речного потока и русловых деформаций

В гидрологии нередко практикуют использование математических моделей русловых деформаций на более высоком (более обобщенном) структурном уровне. Такие модели основаны на оценке динамики непосредственно плановых координат береговой линии.

Например, в работе Н.Е. Кондратьева (1954 г.), а затем и в книге И.В. Попова [9] предлагается следующий вариант расчета плановых деформаций излучин. Рассматривается функция величины смещения бровки вогнутого берега (y , м) от скорости плановых деформаций (c , м/год), продолжительности расчетного периода (T , год), отношения глубин в заданном поперечнике (z_m , м) и наибольшей глубины плеса на участке излучины (z_m , м):

$$y = cT \frac{z_n - z_0}{z_m - z_0}.$$

В Ведомственных строительных нормах [2] эта формула дополнена коэффициентом скорости развития излучины, зависящим от степени ее развитости, выражаемой значением угла разворота.

Метод оценки русловых деформаций, разработанный А.В. Караушевым [4], основан на отношении транспортирующей способности потока и рассчитанного расхода наносов и представляет собой комплекс формул со следующей последовательностью вычислений:

- средняя скорость течения;
- транспортирующая способность потока;
- средняя мутность воды;
- гидромеханический параметр наносов;
- результирующий вертикальный секундный расход наносов через единицу поверхности дна в конце расчетного элемента;
- деформации дна.

Такие экспресс-методы, безусловно, удобны необременительностью вычислений, однако, как уже было изложено выше, они не учитывают всю многофакторность процесса и обозначают лишь краткосрочные тенденции его развития.

К.В. Гришанин [3] исчерпывающе замечает: «Прогноз русловых деформаций по методу баланса наносов состоит в совместном решении уравнений движения потока, уравнений сохранения жидкости и наносов и уравнения транспорта наносов при заданных начальных и граничных условиях». То есть, математическое моделирование речных потоков должно представлять собой математическую аппроксимацию процессов, происходящих в русле реки — движение потока воды, наносов, плановые и глубинные деформации. Комплексный подход такого моделирования состоит во взаимосвязанном учете всех переменных состояния речного потока, а также в непрерывном учете результатов взаимодействия речного потока с руслом. В современном моделировании в гидрологии взаимодействие речного потока и русла, а также связи между гидравлическими характеристиками потока и наносов представлено отдельными, не связанными между собой аналитическими и эмпирическими зависимостями, полученными на основании анализа данных экспериментов. Не исключение составляет и широко используемая в гидрологии система уравнений Сен-Венана, которая в упрощенном виде представляет собой гидродинамическую модель движения потока воды. Часто, с целью получения более расширенного, комплексного результата (например, деформации русла), отдельные расчетные зависимости стыкуют между собой (например, дополняют модель Сен-Венана формулами расхода наносов). Однако в таком подходе присутствуют следующие недостатки:

- Вычисление переменных состояния водного потока проводится без учета влияния находящегося в потоке твердого вещества. Но известно, что с увеличением концентрации твердого вещества в потоке, скорость движения последнего увеличивается.
- Расчет расхода наносов осуществляется на основе вычисленных по гидродинамическим моделям расходов воды. Последние оцениваются без взвесенесущей нагрузки. Тогда как формулы для расчета расходов наносов получены на данных натуральных наблюдений для реальных взвесенесущих потоков.
- Взаимодействие движущегося потока и подстилающей поверхности представлено эмпирическим коэффициентом Шези. В разное время для количественной оценки

коэффициента Шези было получено около 300 формул. Причем размерность этого коэффициента в некоторых формулах не соответствует требуемой. Также следует заметить, что коэффициент Шези зависит только от величины донных частиц. Тогда как в его величину заложена также и информация о физико-механических свойствах грунта, о морфометрических неоднородностях русла и так далее. Это, безусловно, является недостатком.

- Отсутствие физически обоснованной концепции транспорта наносов. Это выражается в том, что эти все эмпирические формулы основаны на опосредованных причинах транспорта наносов. Такие причины являются лишь следствием основных факторов, определяющих как транспорт наносов, так и движение потока в целом.

Создание единого модельного комплекса, учитывающего взаимодействие потоков воды, твердого вещества и русла, позволяет уйти от перечисленных недостатков. Очевидно, что такой модельный комплекс должен представлять собой совокупность математических моделей, описывающих взаимодействие речного потока и русла и основываться на теоретических положениях гидродинамики и грунтоведения.

В качестве примера такой математической модели речного потока можно привести модель движения воды и твердого вещества, представленную автором в [13]. Основное уравнение модели движения воды и твердого вещества в одномерной постановке для гранулометрически однородных по составу частиц имеет вид:

$$(1-f) \left(mg \left[I - \frac{\partial H}{\partial L} \right] - m \frac{dv}{dt} \right) - N_{act} m_q \frac{dv_q}{dt} + N_{act} m_q g - cS = 0, \quad (1)$$

где f — коэффициент внутреннего трения, б/р; m — масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; I — уклон дна; H — глубина потока, м; L — расстояние, м; v — скорость потока, м/с; t — время, с; N_{act} — количество перемещаемых частиц в потоке; m_q — масса частицы, кг; v_q — скорость движения частицы, м/с; c — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²) (для несвязного грунта $c = 0$); S — площадь приложения силы, м².

Уравнение (1) замыкается уравнениями неразрывности потока (2), скорости движения частицы в потоке (3) и уравнением баланса кинетической энергии потока и частиц (4):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + H \frac{\partial v}{\partial L} + v \frac{\partial H}{\partial L} = 0, \quad (2)$$

$$v_q = \sqrt{v^2 + \omega^2}, \quad (3)$$

$$\frac{dE_{\text{потока}}}{dt} - \frac{dE_{\text{частиц}}}{dt} = 0, \quad (4)$$

где ω — гидравлическая крупность частицы, м/с; $E_{\text{потока}}$ — кинетическая энергия потока, $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$; $E_{\text{частиц}}$ — кинетическая энергия частиц, $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$. Важно заметить, что в модели используется вес частицы в воде.

Приведенная единая расчетная модель движения потока и взвешенных частиц с достаточно физически обоснованной аппроксимацией этого процесса позволяет проследить судьбу взвешенного вещества не только по факту наличия его в потоке, но и учесть скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока. Учет скорости осаждения частицы приводит к тому, что частица будет осаждаться на дно потока не сразу, как уменьшился транспортирующий потенциал потока, а в соответствии со своей гидравлической крупностью и исходной скоростью перемещения. На такую схему расчета, несомненно, накладывается принятая пространственно-временная дискретизация.

Взаимодействие движущегося потока воды и подстилающей поверхности в модели движения воды и твердого вещества представлено не традиционным эмпирическим коэффициентом Шези, а физически обоснованной формулой, описывающей взаимодействие движущегося потока и подстилающей поверхности.

Таким образом, представленная модель позволяет получать такие переменные состояния потока воды и твердого вещества, как глубину и скорость воды, количество и скорость перемещаемых в потоке частиц (расход наносов).

Динамика русловой морфометрии и, как следствие, временной масштаб модели движения воды и твердого вещества, должен определяться порядком переменных состояния потока. Традиционно, используется пространственный масштаб от нескольких метров до километра (на прямолинейном участке реки), временной масштаб — секунды и десятки секунд. Непродолжительных в отношении расчетного шага по времени вычислений вполне достаточно для того, чтобы обозначить тенденции в развитии руслового процесса и, в согласии с характером полученной динамики, дать краткосрочный прогноз.

Прогноз русловых деформаций

Многие существующие методы прогноза русловых деформаций (например, [2]) не учитывают изменения условий формирования твердого и жидкого стока на водосборе. Как правило, эти методы ориентированы на продолжение тенденций развития руслового процесса в однородных климатических и гидро- и морфометрических условиях. Очевидно, что скорость и характер русловых деформаций определяются как глобальными климатическими изменениями, так и антропогенными мероприятиями на водосборе и различными гидротехническими работами в самом русле реки.

Для количественной оценки русловых деформаций в долгосрочных прогнозах будет правильно использовать данные о параметрах распределения метеорологических величин, представленные в различных климатических сценариях. На основании прогнозных значений параметров распределения метеорологических величин в результате имитационного моделирования ряды метеорологических элементов обеспечивают вход в математическую модель формирования твердого и жидкого стока на водосборе.

И далее переменные состояния речного потока (расходы воды и наносов, отметки дна и т.д.) вычисляются уже в соответствии с заданным климатическим сценарием. Имитационное моделирование метеорологических рядов сколь угодно длины (сотни и тысячи лет) позволяет осветить все фазы развития крупномасштабных русловых форм и дать соответствующий долгосрочный прогноз как для условий возможных изменений климата, так и для текущего климатического фона.

В качестве примера имитационной модели можно привести стохастическую модель погоды [12]. Стохастическая модель погоды генерирует поток случайных чисел, соответствующих последовательностям суточных сумм осадков, среднесуточных температур и относительной влажности воздуха в различных точках речного бассейна с учетом их параметров распределения и пространственно-временных закономерностей. Для оценки параметров модели по данным метеорологических наблюдений разработан специальный пакет программ.

Имитационное моделирование метеорологических элементов может быть полезно и при прогнозе русловых деформаций при различном антропогенном воздействии на водосбор. Для этого вход в модель формирования стока на водосборе обеспечивается сгенерированными рядами метеорологических элементов, полученных для параметров распределения метеорологических величин, характеризующих текущий или прогнозный климатический фон. В параметры модели формирования стока, характеризующие условия формирования стока на водосборе, вносятся соответствующие изменения (изменяется площадь распаханной территории, залесенность и так далее). Полученные в результате моделирования для заданных условий ряды расходов воды и наносов обеспечат математическую модель речного потока начальными данными.

Выводы

Таким образом, при долгосрочном прогнозе русловых деформаций должны приниматься во внимание основные факторы, определяющие этот процесс, — климат, формирование твердого и жидкого стока на водосборе, движение воды и твердого вещества в русле и их внутригодовое распределение. При этом современные математические модели речных потоков должны характеризоваться физически обоснованным описанием взаимодействия речного потока и дна и взаимосвязанным расчетом переменных состояния потока воды и твердого вещества в русле.

Литература

1. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 213 с.
Vinogradov Yu.B. Matematicheskoe modelirovanie protsessov formirovaniya stoka. — L.: Gidrometeoizdat, 1988. — 213 s.
2. ВСН 163–83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). — М.: Миннефтегазстрой, 1985. — 117 с.
VSN 163–83. Uchet deformatsiy rechnykh rusel i beregov vodoemov v zone podvodnykh perekhodov magistral'nykh truboprovodov (neftegazoprovodov). — M.: Minneftegazstroy, 1985. — 117 s.
3. *Гришанин К.В.* Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 428 с.
Grishanin K.V. Dinamika ruslovykh potokov. — L.: Gidrometeoizdat, 1969. — 428 s.

4. *Караушев А.В.* Речная гидравлика. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 416 с.
Karaushev A.V. Rechnaya gidravlika. — L.: Gidrometeoizdat, 1969. — 416 s.
5. *Корень В.И.* Математические модели в прогнозах речного стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 200 с.
Koren' V.I. Matematicheskie modeli v prognozakh rechnogo stoka. — L.: Gidrometeoizdat, 1991. — 200 s.
6. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. — СПб.: Наука, 2007 — 253 с.
Kondrat'ev S.A. Formirovanie vneshney nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniya. — SPb.: Nauka, 2007 — 253 s.
7. *Лемешко Н.А.* Перспективные технологии для современного сельскохозяйственного производства. — СПб., 2007, с. 144–171.
Lemeshko N.A. Perspektivnyye tekhnologii dlya sovremennogo sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva. — SPb., 2007, s. 144–171.
8. *Липовицкая И.Н.* Методы восстановления структуры нижней тропосферы. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2006, № 6–1(148), с. 193–197.
Lipovietskaya I.N. Metody vosstanovleniya struktury nizhney troposfery. // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU, 2006, № 6–1(148), s. 193–197.
9. *Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 364 с.
Popov I.V. Deformatsii rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. — L.: Gidrometeoizdat, 1969. — 364 s.
10. Рекомендации по учету деформаций речных русел при проектировании инженерных сооружений на реках зоны Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. — Л.: Гидрометеиздат, 1983.
Rekomendatsii po uchetu deformatsiy rechnykh rusel pri proektirovanii inzhenernykh sooruzheniy na rekakh zony Baykalo-Amurskoy zheleznodorozhnoy magistrali. — L.: Gidrometeoizdat, 1983.
11. СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08.31-2012 «Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учёт руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров». — СПб., 2012. — 140 с.
STO FGBU «GGI» 52.08.31-2012 «Dobycha nerudnykh stroitel'nykh materialov v vodnykh ob'ektakh. Uchet ruslovogo protsessa i rekomendatsii po proektirovaniyu i ekspluatatsii ruslovykh kar'erov». — SPb., 2012. — 140 s.
12. *Шмакова М.В.* Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования характеристик стока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — СПб., 2000. — 161 с.
Shmakova M.V. Stokhasticheskaya model' pogody v sisteme determinirovano-stokhasticheskogo modelirovaniya kharakteristik stoka. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. — SPb., 2000. — 161 s.
13. *Шмакова М.В.* Расчет заносимости русловых карьеров. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 46–57.
Shmakova M.V. Raschet zanosimosti ruslovykh kar'erov. // Uchenye zapiski RGGMU, 2012, № 26, s. 46–57.