

УДК 556.166

Современные методы инженерной гидрологии для решения экологических задач

© 2007. В.А.Лобанов, В.Ю.Поляков
НПО «Гидротехнологии»

Расчётные гидрологические характеристики, определяемые методами инженерной гидрологии, являются основой для решения любых экологических задач. Отечественная инженерная гидрология находится в настоящее время в кризисном состоянии в связи с отсутствием региональных методов и моделей. В настоящей работе предлагаются пути выхода из кризиса, связанные с созданием региональных специализированных ГИС, новых методов и инновационных компьютерных технологий. Специализированная региональная ГИС включает в себя базу данных, состоящую из многолетних рядов гидрологических характеристик и электронных карт, программное обеспечение для определения расчётных гидрологических характеристик в пунктах наблюдений и методы, программы и региональные модели для определения расчётных гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений в любой точке гидрографической сети. Рассмотрены разработанные компьютерные технологии и новые методы пространственной интерполяции, гидрологической аналогии и построения региональных моделей, а также дана методика оценки эффективности эмпирических зависимостей.

Design hydrological characteristics, obtained by methods of engineering hydrology, are the basis for decision of any ecological task. Native engineering hydrology is in a crisis state today according to absence the regional methods and models. In this paper the ways out of a crisis are suggested which deal with a development of specialized regional GIS, new methods and innovation computer technologies. Specialized regional GIS includes: the data base consisted in long-term time series of hydrological characteristics and digital maps; software for computations of design hydrological characteristics in gauged sites and methods, software and regional models for determination of design hydrological characteristics for ungauged sites in any point of hydrographic network. Developed computer technologies and new methods of spatial interpolation, hydrological analogy, construction of regional models are considered as well as the technique of assessment of efficiency of empirical relationships is given.

Введение

Инженерная гидрология, которая оперирует с расчётными или обеспеченными гидрологическими характеристиками, является основой для обобщения любой экологической информации по водным объектам. Один из наиболее показательных примеров – использование минимального летнего стока 80%-ной или 90%-ной обеспеченности в качестве экологического стока. Также для оценки наиболее неблагоприятной концентрации загрязняющих веществ необходимо рассматривать композицию, по крайней мере, из двух распределений: источника загрязнения и межени стока в реке. С другой стороны, для оценки экологических показателей водных объектов, к которым принадлежат и реки, необходимо определять основные гидрологические характеристики в устьях рек, где наблюдения в большинстве случаев отсутствуют и для расчётов могут быть применены только региональные и интерполяционные методы инженерной гидрологии. Ещё одна проблема состоит в том, что расчётные гидрологические характеристики, особенно в современных изменяющихся условиях, не являются стабильными,

и необходимо осуществлять их мониторинг и периодически пересчитывать. Поэтому в современном нормативном документе по определению основных расчётных гидрологических характеристик (СП 33-101-2003) [1] не приводится, по сравнению с действовавшим ранее СНиП 2.01.14-83 [2], ни одного расчётного значения и ни одного параметра региональных зависимостей на основе которых можно получить расчётные характеристики в неизученном пункте. В СП 33-101-2003 даны только общие методы при наличии, недостаточности и отсутствии данных наблюдений, практическая реализация которых ещё требует больших научных и технических усилий. Что делать специалисту, выполняющему гидрологические расчёты в этих условиях, и как дальше осуществлять развитие инженерной гидрологии, именно ответам на эти вопросы и посвящена настоящая статья.

Стратегия развития современной инженерной гидрологии

В конце 1960-х – начале 1970-х годов отечественными гидрологами была выполнена беспрецедентная по своей значимости и

объёму работа – подготовка серии монографий «Ресурсы поверхностных вод СССР», включающей более 20 томов региональных обобщений основных характеристик гидрологического режима по бассейнам всех рек бывшего Советского Союза [3]. Приведённые в этих монографиях карты параметров распределений и коэффициенты региональных зависимостей использовались в дальнейшем при подготовке нормативного документа СНиП 2.01.14-83 и Пособия по определению расчётных гидрологических характеристик [4] и широко применялись в практике инженерной гидрологии вплоть до начала XXI века. Отмена этих региональных обобщений в новом СП 33-101-2003 связана с тем, что параметры, полученные на основе ограниченной информации, включающей данные наблюдений в лучшем случае до начала 1970-х годов, стали ненадёжными и приводили к большим погрешностям расчётов. Кроме того, оценка эффективности большинства региональных схем и формул отсутствовала, что ставило под сомнение их достоверность. Вместе с тем за последние годы были разработаны как новые эффективные методы построения региональных зависимостей, так и методика оценки эффективности построения любых зависимостей на основе эмпирических данных [5]. Поэтому к настоящему времени сформировалась как методическая база, так и острая необходимость в повторении работ по созданию моделей региональной инженерной гидрологии на новом научном и техническом уровне.

В стратегическом отношении для формирования современной региональной инженерной гидрологии существуют два основных пути:

- разработка Территориальных строительных норм (ТСН) – нормативных документов субъектов Российской Федерации в соответствии со СНиП 10.01-94 «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения» [6],
- разработка региональных геоинформационных систем по гидрологическим расчётам.

Первый путь имеет следующие проблемные положения:

- региональная гидрология должна основываться не на административном, а на бассейновом принципе и однородных гидрологических районах, которые могут совершенно не соответствовать субъектам Федерации;

- полученные расчётные гидрологические характеристики не являются стабильными, поэтому ТСН будут требовать постоянного переиздания;
- имеется около 80 субъектов Российской Федерации, а разработка ТСН для каждого из них требует, по крайней мере, 1 год времени и не может осуществляться одновременно для всех субъектов.

Кроме того, требуются значительные усилия и время для обоснования и согласования работ, а также для получения финансирования в административных органах субъектов Федерации. В результате первый путь является тупиковым, т. к. ещё не до конца разработанные ТСН уже будут требовать переизданий.

Второй путь основан на современных научных, информационных и компьютерных технологиях и позволяет проводить в оперативном режиме как научные региональные исследования и пересчёт параметров распределений и коэффициентов региональных зависимостей, так и выполнять инженерные гидрологические расчёты для проектируемых объектов. При этом любая региональная ГИС включает три основные части: региональную базу данных, программные средства для определения расчётных гидрологических характеристик в пунктах наблюдений и средства и модели для определения расчётных гидрологических характеристик в любой точке территории при отсутствии данных гидрологических наблюдений. В работе [7] предлагается, что региональная ГИС может иметь две версии: ГИС-Разработчик и ГИС-Пользователь. В первой версии ГИС имеет инструментарий для разработки региональных зависимостей и оценки их эффективности, а во второй версии – базу региональных знаний, т. е. уже полученные региональные зависимости, которые используются для выполнения гидрологических расчетов. В общем случае обе версии можно объединить в одну, если дать пользователю возможность как самому получать региональные зависимости, так и использовать уже разработанные модели для выполнения расчётов при отсутствии данных наблюдений.

Основной принцип построения региональных ГИС – бассейновый, что соответствует выпускам Государственного водного кадастра (Гидрологические ежегодники), включающим 26 регионов на территории России. Вместе с тем полученные региональные модели могут использоваться и в субъектах Российской Федерации, что сохраняет возможность для формирования ТСН с це-

люю придания правового (юридического) статуса для применения разработанных региональных методов и моделей на территории данного административного образования.

Общая схема специализированной региональной ГИС по гидрологическим расчетам

Технологическая схема региональной ГИС приведена на рисунке 1 и включает следующую последовательность её создания и функционирования:

- формирование региональной базы многолетних рядов основных гидрологических характеристик (среднегодовые, среднемесячные, максимальные и минимальные расходы воды) в пунктах наблюдений;
- разработка программного обеспечения для определения параметров и расчётных гидрологических характеристик в пунктах наблюдений;
- определение параметров распределений и расчётных гидрологических характеристик во всех пунктах наблюдений;
- формирование картографической региональной базы данных, включаю-

- щей стандартные и специализированные геоинформационные слои;
- разработка комплекса программ для пространственного обобщения (интерполяции) параметров и расчётных характеристик и расчётов по реке-аналогу;
- разработка комплекса программ для построения и оценки эффективности эмпирических региональных зависимостей;
- построение региональных зависимостей параметров и расчётных гидрологических характеристик от основных гидрографических факторов и формирование базы моделей и их параметров;
- разработка программного обеспечения для расчёта по полученным региональным зависимостям.

Рассмотрим содержание отдельных блоков специализированной ГИС. При условии, что первоосновой любых расчётов является информация, то региональная база многолетних рядов гидрологических данных должна включать в себя:

- все многолетние данные разной продолжительности в пунктах сети наблюдений Росгидромета (в том числе и закрытых) в пределах рассматриваемой территории;



Рис.1. Общая схема региональной ГИС для выполнения гидрологических расчётов

- многолетние данные разной продолжительности в пунктах наблюдений на сопредельной территории для осуществления пространственной интерполяции;
- наиболее продолжительные ряды в пунктах-аналогах на сопредельной территории для осуществления приведения рядов в регионе к многолетнему периоду;
- данные наблюдений других ведомственных сетей как внутри рассматриваемого региона, так и на ближайших сопредельных территориях;
- кратковременные данные гидрометеорологических изысканий различных министерств и ведомств в пределах рассматриваемой территории.

Фактически пункты наблюдений с продолжительными рядами за пределами региона необходимы только на стадии приведения всех рядов наблюдений в пределах района к многолетнему периоду. Также и пункты наблюдений, которые находятся на сопредельных территориях, необходимы только в частных случаях для перехода от экстраполяции к интерполяции на границах региона.

Программное обеспечение для выполнения гидрологических расчётов в пунктах наблюдений предназначено для реализации общей последовательности определения расчётных гидрологических характеристик, которая содержит следующие основные шаги:

- формирование ряда в рассматриваемом пункте и рядов в пунктах-аналогах;
- оценка однородности и стационарности исходных данных в рассматриваемом пункте и пунктах-аналогах (для выбора репрезентативных аналогов или их периодов);
- приведение непродолжительного ряда наблюдений в рассматриваемом пункте к многолетнему периоду;
- оценка однородности и стационарности данных в рассматриваемом пункте, приведённых к многолетнему периоду с целью оценки эффективности восстановления;
- определение параметров и квантилей в рассматриваемом пункте в однородных условиях, с учётом генезиса формирования и с учётом исторического максимума или в условиях влияния хозяйственной деятельности;
- формирование атрибутивных таблиц в формате специализированной ГИС, содержащих рассчитанные параметры и квантили, связанные с координатами центров тяжести водосборов.

В настоящее время разработанное программное обеспечение для выполнения гидрологических расчётов представлено в виде программного комплекса «ГИДРОРАСЧЁТЫ», включающего следующие основные вычислительные модули:

1. База данных «ГИДРОРАСЧЁТЫ», представляющая собой систему управления базами данных основных гидрологических характеристик водных объектов и являющаяся главным модулем программного комплекса.

2. Вычислительный модуль «ОДНОРОДНОСТЬ», предназначенный для оценки однородности резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении по статистическим критериям Диксона и Смирнова-Граббса и однородности (стационарности) основных параметров временных рядов гидрологических характеристик: средних значений и дисперсий по статистическим критериям Стьюдента и Фишера.

3. Вычислительный модуль «АНАЛОГ», предназначенный для восстановления пропусков наблюдений и приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду для двух основных ситуаций: продолжительность рядов наблюдений более 6-10 лет и менее 6 лет, для чего применяются следующие методические подходы:

- регрессионные зависимости с более продолжительными рядами-аналогами;
- построение пространственных однофакторных зависимостей между разными годами наблюдений.

4. Вычислительный модуль «ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ», предназначенный для определения параметров функций распределения и основных расчётных гидрологических характеристик по ряду наблюдений на основе аппроксимации аналитическими распределениями Пирсона 3 типа и Крицкого-Менкеля.

5. Вычислительный модуль «СОСТАВНЫЕ КРИВЫЕ», предназначенный для определения расчётных гидрологических характеристик в случае генетической неоднородности исходных данных гидрометрических наблюдений.

6. Вычислительный модуль «ИСТОРИЧЕСКИЙ МАКСИМУМ», предназначенный для определения параметров распределений и расчётных значений гидрологических характеристик с учётом исторических максимумов.

7. Вычислительный модуль «ВНУТРИГОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ», предназначенный для определения расчётного внут-

ригодного распределения стока методом компановки, методом реального года и осреднением в грациях водности.

8. Вычислительный модуль «ГИДРОГРАФ», предназначенный для определения расчётных гидрографов стока воды рек весеннего половодья и дождевых паводков.

9. Вычислительный модуль «ПРОФИЛЬ», предназначенный для определения расчетных уровней воды (глубин) по профилю, расчётным значениям расхода воды и скоростям течения. В модуле ведётся БД по всем рабочим профилям и их отметкам. Результаты расчётов выводятся в текстовом и графическом виде.

10. Вычислительный модуль «РАЗМЫВ», предназначенный для определения профиля предельного размыва по измеренному профилю сечения, расчётным значениям уровней воды и типу руслового процесса [8].

В результате расчётов для всех пунктов в регионе будет получена база данных многолетних рядов, приведённых к многолетнему периоду, а также параметры и квантили для основных расчётных гидрологических характеристик, которые могут использоваться для интерполяции, выбора аналогов и построения региональных зависимостей.

Следующей частью региональной ГИС является база электронных карт, состоящих из отдельных геоинформационных слоёв, включающих как стандартные слои физико-географической карты (гидрография, рельеф, растительность, пункты наблюдений, дороги и другие), а также специализированные гидрологические слои: пункты наблюдений, контуры водосборов и центры тяжести водосборов. Для связи геоинформационных слоёв с базой данных многолетних рядов гидрологических характеристик и метаданными (площадь водосбора, лесистость, заболоченность, высота водосбора, уклон и т. д.) разработано программное обеспечение, которое позволяет как переходить от объектов слоя пунктов наблюдений к связанным с ним рядам в базе данных, так и передавать расчётные параметры распределений и квантили в атрибутивные таблицы слоя центров тяжести водосборов для воспроизведения их на карте. Фактически разработанный программный модуль «КАРТА» представляет собой программное обеспечение специализированной ГИС, реализующее следующие её основные функции:

- считывание информации о геоинформационных слоях электронных карт,

подготовленных в форматах стандартных ГИС (MapInfo и ArcView);

- создание основных объектов геоинформационных слоёв (точки, полилинии, полигоны) средствами модуля «КАРТА»;
- работа с отдельными объектами геоинформационных слоёв (выбор, перемещение, редактирование и т. д.);
- преобразование в различные картографические проекции.

Основная особенность модуля «КАРТА» состоит в том, что он органически встроен в программный комплекс «Гидрорасчёты» и не требует привлечения стандартных ГИС типа MapInfo и ArcView.

Классификация методов расчёта гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений

Следующей частью региональной ГИС является программное обеспечение для определения расчётных гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений. В общем случае для выполнения расчётов при отсутствии данных наблюдений в гидрологии существует много разных способов, которые можно систематизировать следующим образом:

- осреднение в однородном районе в случае, если изменение рассматриваемых характеристик небольшое (практически не превышает погрешности их определения) и закономерности по пространству отсутствуют;
- построение карт изолиний или пространственная интерполяция в случае, если пространственные изменения существенные и неслучайные;
- применение метода гидрологической аналогии, если имеют место близкие условия формирования стока в неизученном пункте и пункте-аналоге, в котором имеют место наблюдения;
- построение региональных зависимостей стоковых характеристик от основных гидрографических и физико-географических факторов водосборов;
- построение зависимостей между погодичными стоковыми характеристиками и стокоформирующими факторами;
- применение уравнений водного баланса.

Все перечисленные методы объединяются в три основные группы:

- методы пространственных обобщений (осреднение, интерполяция, аналог),

- основанные только на гидрологической информации в пунктах наблюдений;
- региональные модели для обобщённых гидрологических характеристик (параметры распределения, расчётные гидрологические характеристики) от гидрографических и физико-географических факторов (площадь водосбора, высота, уклон, лесистость, обобщённые характеристики осадков и т. д.);
- модели водосборов для погодичных характеристик стока от стокоформирующих факторов (эмпирико-статистические зависимости, уравнения водного баланса, математические модели формирования стока).

В связи с тем, что инженерная гидрология имеет дело с расчётными гидрологическими характеристиками, наиболее близкими для неё являются первые две группы методов, что в региональной ГИС также представлено в виде двух программных блоков. Первый блок включает методы пространственных обобщений, которые позволяют работать с исходной или обобщённой информацией в пунктах наблюдений. В методе пространственного осреднения основными условиями является отсутствие пространственных закономерностей и сопоставимость пространственной изменчивости рассматриваемого параметра с погрешностью его определения, что можно представить в виде критерия Фишера:

$$F_p = \sigma_{\text{пр}}^2 / \sigma_{\text{пог}}^2 \leq F_{\text{кр}, \alpha}, \quad (1)$$

где: F_p – расчётное значение статистики критерия Фишера, $F_{\text{кр}, \alpha}$ – критическое значение статистики Фишера при уровне значимости α ; $\sigma_{\text{пр}}^2$ – дисперсия пространственной изменчивости рассматриваемой гидрологической характеристики (среднее значение, коэффициент вариации, расчётный 1%-ный модуль максимального стока и т. д.); $\sigma_{\text{пог}}^2$ – дисперсия погрешности определения рассматриваемой гидрологической характеристики.

При уровне значимости $\alpha = 5\%$ $F_{\text{кр}}$ при средних для гидрологии объёмах рядов, коэффициентах асимметрии и автокорреляции близко к 2, и это свидетельствует о том, что осреднение может быть реализовано, если пространственная изменчивость отличается от погрешности расчётов не более чем в 2 раза. Если всё же пространственная изменчивость характеристики существенно превышает погрешность, а закономерностей по территории не наблюдается, то пространственная статистическая модель должна быть

представлена уже двумя параметрами: средним и дисперсией (стандартным отклонением), хотя точность определения на её основе для неизученного пункта будет ниже.

Методы пространственной интерполяции

Для всех остальных случаев используются методы интерполяции и аналогии, причём метод аналогии является частным случаем пространственной интерполяции, т. к. использует информацию только по одному пункту. Ранее в инженерной гидрологии методы интерполяции ассоциировались только с построением карт изолиний и последующей линейной интерполяцией в центр тяжести неизученного водосбора между наведёнными сглаженными изолиниями. При современных технологиях компьютерной обработки информации понятие изолинии практически отсутствует, т. к. в результате интерполяции будет получена пространственная сеточная модель с любым размером ячеек сетки и соответствующим проинтерполированным значением в каждой ячейке. Для интерполяции в узлы регулярной сетки обычно применяются детерминированные интерполяционные методы: полиномиальная, линейная кубическая интерполяция, бикубическая, точечная, интерполяция с помощью окна, различные виды сплайн-интерполяции и т. д. [9]. Как правило, детерминированная интерполяция применяется для обобщённых гидрологических характеристик (среднее значение, коэффициент вариации), для которых географическая составляющая является преобладающей. Если перейти к интерполяции погодичных значений, больший вес может уже иметь индивидуальная составляющая (азональность, синоптическая изменчивость) и в этом случае эффективнее использовать детерминировано-статистические методы интерполяции, типа оптимальной интерполяции на основе пространственной корреляционной функции [10].

В общем случае имеет место пространственный дуализм любой гидрологической характеристики, проявляющийся в её пространственной непрерывности и дискретности. При этом непрерывность обусловлена свойством географической зональности, а дискретность выражена в виде однородных гидрологических районов, в которых имеют место региональные зависимости от определяющих факторов. Раскрытие дуализма может быть представлено в виде следующей зависимости:

$$Q = f_1(\text{широта, долгота}) + f_2(X_1, X_2, X_3, \dots) \pm E, \quad (2)$$

где: Q – рассматриваемая гидрологическая характеристика; f_1 (широта, долгота) – составляющая географической зональности, представляющая собой зависимость от координат центров тяжести водосборов; $f_2(x_1, x_2, x_3, \dots)$ – региональная составляющая, представляющая собой зависимость от основных факторов (x_1, x_2, x_3, \dots) в данном однородном районе; E – неучтённые и индивидуальные факторы.

Соотношение между этими двумя составляющими и определяет эффективность применения методов интерполяции и регионализации. Так, например, для нормы годового стока, пунктов наблюдений со средними площадями водосборов и для достаточно большой территории вклад зональной составляющей будет определяющим и применение методов пространственной интерполяции вполне правомерно. Если же в качестве характеристики рассматривать 1%-ный модуль максимального стока с малых водосборов небольшой территории, то скорее всего вклад зональной составляющей будет небольшим и для расчётов необходимо использовать только региональные зависимости. Поэтому прежде, чем применять методы интерполяции необходимо, по крайней мере, оценить статистическую значимость зависимости картируемой гидрологической характеристики от координат центров тяжести водосборов.

Если всё же установлено, что зависимость от координат существует, то для детерминированной пространственной интерполяции помимо сеточной модели, которая содержит большой объём невостребованной информации, можно предложить метод, основанный на определении проинтерполированного значения в заданную точку пространства. Метод основан на определении средневзвешенной гидрологической характеристики с весами обратно пропорциональными расстояниям (или квадратам расстояний) от рассматриваемой точки до линии, соединяющей каждые две точки с гидрологическими характеристиками. Это расстояние представляет собой перпендикуляр и является изолинией, полученной в результате линейной интерполяции между каждой парой точек. Выражение для получения интерполированного значения имеет вид:

$$\mu_{cp} = \frac{1/h_1 * \mu_1 + 1/h_2 * \mu_2 + \dots}{\sum(1/h_1 + 1/h_2 + \dots)}, \quad (3)$$

где: μ_{cp} – проинтерполированное значение гидрологической характеристики в заданной

точке пространства; μ_1, μ_2, \dots – значения гидрологической характеристики, полученные на основе линейной интерполяции между каждой парой точек с информацией; h_1, h_2, \dots – расстояния от рассматриваемой точки по перпендикуляру до линии, соединяющей каждую пару пунктов наблюдений.

Каждое значение h вычисляется при этом следующим образом:

$$h = 2[\sqrt{p(p-a) + (p-b) + (p-c)}] / a, \quad (4)$$

где: $p = (a+b+c)/2$,
 $a = \sqrt{(Y_j - Y_i)^2 (X_j - X_i)^2}$,
 $b = \sqrt{(Y_z - Y_i)^2 (X_z - X_i)^2}$,
 $c = \sqrt{(Y_z - Y_j)^2 (X_z - X_j)^2}$,
 $X_i, Y_i, X_j, Y_j, X_z, Y_z$ – координаты (долгота и широта) каждой пары пунктов (i и j) и неизученного водосбора (z).

Каждое проинтерполированное значение (μ) определяется по формуле:

$$\mu = \mu_i + a_1/a * \Delta, \quad (5)$$

где: $a_1 = \sqrt{(b^2 - h^2)}$, $\Delta = \mu_j - \mu_i$ при $a_1 < a$, μ_i, μ_j – значения гидрологических характеристик в точках i и j .

Другой вариант предлагаемого метода основан на осреднении с весами обратно пропорциональными квадрату расстояния (или расстоянию) от центра тяжести неизученного водосбора до центра тяжести каждого водосбора с гидрологической характеристикой:

$$Y_m = K_1 Y_1 + K_2 Y_2 + \dots + K_n Y_n, \quad (6)$$

при $K_1 = (1/l_1^2) / (1/l_1^2 + 1/l_2^2 + \dots + 1/l_n^2)$,

$K_2 = (1/l_2^2) / (1/l_1^2 + 1/l_2^2 + \dots + 1/l_n^2), \dots$,

где: Y_m – интерполируемое значение гидрологической характеристики в центр тяжести неизученного водосбора m ; Y_1, Y_2, \dots, Y_n – значения гидрологической характеристики в центрах тяжести n изученных водосборов; K_1, K_2, \dots, K_n – весовые коэффициенты; l_1, l_2, \dots, l_n – расстояния между центром тяжести неизученного водосбора и центрами тяжести изученных водосборов (в градусах или км).

Предлагаемые методы интерполяции требуют апробации и проверки на независимой информации, чтобы оценить, какое наилучшее число точек выбрать для интерполяции. Очевидно, что в зависимости от гидрологической характеристики и расположения района, результаты будут разные. Поэтому программное обеспечение для интерполяции должно включать в себя блок оценки эффективности интерполяции на независимом материале, например, при последовательном

исключении из расчётов по одному пункту наблюдений, в который будет осуществляться интерполяция.

Метод гидрологической аналогии

Понятие гидрологической аналогии в СП 33-101-2003 неоднозначно и практически не формализовано. Так, например, в п.4.10 СП сказано:

«При выборе рек-аналогов необходимо учитывать следующие условия:

- однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки;
- географическую близость расположения водосборов;
- однородность условий формирования стока, сходство климатических условий, однотипность почв (грунтов) и гидрогеологических условий, близкую степень озёрности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов;
- средние высоты водосборов не должны существенно отличаться, для горных и полугорных районов следует учитывать экспозицию склона и гипсометрию;
- отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы воды, изъятие стока на орошение и другие нужды)».

Перечисленные условия не являются формализованными и свидетельствуют лишь о том, что аналог не должен располагаться далеко от рассматриваемого пункта, должен находиться в естественных условиях формирования стока и иметь близкие значения таких гидрографических факторов как средняя высота водосбора, залесенность, озёрность, заболоченность и распаханность. При этом, предполагается, что другие приоритетные факторы, такие как площадь водосбора и уклон реки и водосбора, могут и отличаться.

Если рассматривать определение аналога в разделе 6 СП для определения гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений, то главным формализованным показателем аналога является значение коэффициента корреляции, которое не должно быть меньше $R=0,7$ и характеризует синхронность колебаний для рассматриваемой реки и реки-аналога. При данном значении $R \geq 0,7$ автоматически обеспечивается выполнение всех других условий статистически значимого уравнения связи между ря-

дом наблюдений гидрологических характеристик в рассматриваемом пункте и пункте-аналоге при условии, что совместный период наблюдений более 6 лет.

Ещё одним условием аналогии для максимального стока является примерное равенство следующих отношений гидрографических факторов (п.7.25 СП 33-101-2003):

$$L/A^{0,56} \approx L_a/A_a^{0,56}, \quad (7)$$

$$J \cdot A^{0,50} \approx J_a \cdot A_a^{0,50}, \quad (8)$$

где: L и L_a – соответственно длина исследуемой реки и реки-аналога, км; J и J_a – уклон водной поверхности исследуемой реки и реки-аналога, промилле; A и A_a – площади водосборов исследуемой реки и реки-аналога, км².

Все перечисленные условия выбора аналога можно формализовать следующим образом. Прежде всего, должно соблюдаться условие синхронности, которое характеризуется достаточно высоким коэффициентом парной корреляции: $R \geq 0,7-0,8$ и существованием статистически значимого уравнения на основе которого можно осуществить синтез многолетних данных в рассматриваемом пункте по информации в пункте-аналоге:

$$Q_i = b_1 Q_{ai} + b_0 \quad \text{или} \quad Q_i = \sigma/\sigma_a \cdot R(Q_{ai} - Q_{cpa}) + Q, \quad (9)$$

где: b_1 , b_0 – коэффициенты уравнения и $b_1 = \sigma/\sigma_a \cdot R$, $b_0 = Q_{cp} - b_1 \cdot Q_{cpa}$, Q_i , Q_{ai} – значения гидрологической характеристики в i -год в рассматриваемом пункте и пункте-аналоге; Q_{cp} , Q_{cpa} – средние многолетние значения гидрологической характеристики в рассматриваемом пункте и пункте-аналоге, σ , σ_a – средние квадратические отклонения гидрологической характеристики в рассматриваемом пункте и пункте-аналоге.

Если уравнение (9) переписать в модулях стока (M_i) и коэффициентах вариации (C_v), то оно будет иметь следующий вид:

$$M_i = A/A_a \cdot C_v/C_{va} \cdot M_{cp}/M_{cpa} \cdot R(M_{ia} - M_{cpa}) + M_{cp}, \quad (10)$$

где: A , A_a – площади водосборов рассматриваемой реки и реки-аналога; C_v , C_{va} – коэффициенты вариации рассматриваемой реки и реки-аналога; M_{cp} , M_{cpa} – средние многолетние модули стока рассматриваемой реки и реки-аналога.

Коэффициент корреляции между рассматриваемым пунктом и аналогом можно определить на основе пространственной корреляционной функции, представляющей собой обратную связь между коэффициентами парной корреляции и расстоянием между центрами тяжести водосборов:

$$R_{ij} = f(D_{ij}), \quad (11)$$

где: R_{ij} – коэффициент парной корреляции между каждой парой рядов наблюдений в однородном районе; D_{ij} – расстояние между центрами тяжести водосборов (км).

Как правило, пространственная корреляционная функция для многих гидрологических характеристик, и особенно для максимального стока, имеет небольшой радиус корреляции (расстояние от $D=0$ до $D=f(R_{кр}=0,7-0,8)$) и большой разброс точек в верхней части кривой, обусловленный анизотропностью (неравенством по разным направлениям) пространственного поля изокоррелят. В качестве примера на рисунке 2 показана пространственная корреляционная функция максимального стока в районе средней Ангары с достаточно большим разбросом парных коэффициентов корреляции, что свидетельствует о неоднородности и анизотропности пространственной функции. Радиус корреляции при $R \geq 0,7-0,8$ не превышает 100 км, хотя по отдельным направлениям высокие значения пространственной связанности имеют место и до 300-400 км. Поэтому в данном случае были выделены два однородных района и для каждого из них построены пространственные корреляционные функции.

В соответствии с (10) для синтеза временного ряда при отсутствии данных наблюдений помимо вычисленного коэффициента корреляции необходимо определить также M_{cp} и C_v в рассматриваемом неизученном пункте. Для определения этих параметров могут быть использованы методы интерполяции и региональные зависимости от гидрографических факторов.

В частном случае, если пункты наблюдений находятся рядом, то параметры распределения также должны быть близкими, т. е.

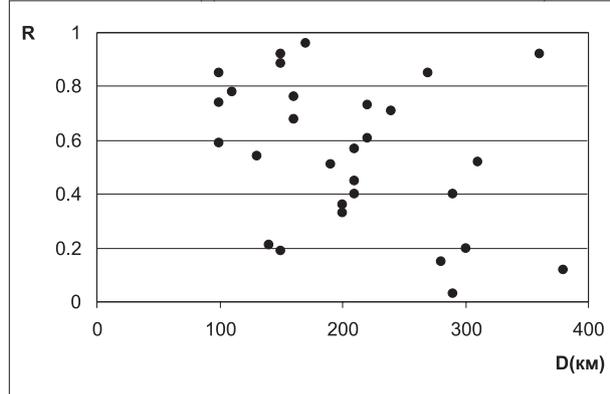


Рис. 2. Пространственная корреляционная функция для наибольших в году расходов воды в районе средней Ангары (9 пунктов наблюдений).

$M_{cp} \approx M_{сра}$, $C_v \approx C_{vа}$, что следует из пространственной интерполяции. Условия (7) и (8) также предназначены для того, чтобы охарактеризовать равенство параметров (среднего многолетнего или коэффициента вариации), исходя из факторов и коэффициентов региональных зависимостей. Если принять, что какое-либо региональное уравнение имеет вид

$$\lg M_{cp} = \lg L - 0.56 \lg A \quad \text{или} \quad M_{cp} = L/A^{0.56},$$

$$\lg M_{сра} = \lg L_a - 0.56 \lg A_a \quad \text{или} \quad M_{сра} = L_a/A_a^{0.56} \quad (12)$$

то при условии равенства $M_{cp} \approx M_{сра}$ имеем равенство правых частей уравнения:

$$L/A^{0.56} \approx L_a/A_a^{0.56}.$$

Аналогично, если принять, что какое-либо региональное уравнение коэффициента вариации имеет вид (для рассматриваемого пункта и аналога):

$$\lg C_v = \lg J - 0.50 \lg A \quad \text{или} \quad C_v = J/A^{0.50}$$

$$\lg C_{vа} = \lg J_a - 0.50 \lg A_a \quad \text{или} \quad C_{vа} = J_a/A_a^{0.50} \quad (13)$$

то при условии равенства $C_v \approx C_{vа}$ получим равенство правых частей уравнения:

$$J \cdot A^{0.50} \approx J_a \cdot A_a^{0.50}.$$

Таким образом, приведенные в СП 33-101-2003 условия (7) и (8) являются частным случаем одной региональной формулы и не могут быть рекомендованы как общие условия выбора аналога при расчёте максимального стока.

Методы построения региональных зависимостей

Региональные расчётные формулы получили широкое распространение в инженерной гидрологии, но в большинстве случаев оценки эффективности этим зависимостям дано не было, так же как и статистического обоснования для включения в формулы множества параметров, каждый из которых зависит от новых переменных. Так, например, в наиболее распространённых в гидрологии редуцированной формуле и особенно в формуле предельной интенсивности в сумме можно насчитать до 20-30 параметров, определяемых по эмпирическим данным. При этом объём информации, который используется для региональных зависимостей обычно не превышает 30-40 пунктов наблюдений. Поэтому очевидно, что в таких зависимостях все коэффициенты не могут быть статистически значимыми. Как правило, в региональные модели входят не более 3-5 основных факторов, учитывающих местные особенности формирования

стока. Общая последовательность построения региональных зависимостей включает три основных этапа:

- предварительный анализ, состоящий в выборе предполагаемых факторов, итерационном выборе однородного района, построении однофакторных зависимостей, осуществлении функциональных преобразований факторов и в конечном итоге – формировании возможных структур региональных зависимостей;
- вычислительный этап, состоящий в определении коэффициентов уравнений разными методами, в оценке их статистической значимости, вкладе факторов в уравнение и в выборе окончательной наиболее эффективной региональной модели;
- этап проверки и корректировки модели, связанный с всесторонним анализом остатков, как на зависимом, так и на независимом от расчёта материале, на основе которого улучшается региональная зависимость и оценивается её реальная погрешность.

Выбор предполагаемых факторов зависит от рассматриваемой гидрологической характеристики и, например, для максимального стока может иметь место следующий набор морфометрических и гидрографических факторов:

- А – площадь водосбора (км²);
- Н – средняя высота водосбора (м);
- $J_{\text{рсп}}$ – средний уклон реки в промиллях (‰);
- $J_{\text{рвзв}}$ – средневзвешенный уклон реки в промиллях (‰);
- $f_{\text{л}}$ – лесистость водосбора (%).
- φ – широта центра тяжести водосбора (в град),
- λ – долгота центра тяжести водосбора (в град).

Координаты центров тяжести водосборов выбраны в качестве факторов для того, чтобы учесть зональную составляющую, связанную с изменением гидрологической характеристики по широте и долготе.

Построение однофакторных зависимостей преследует две цели: установить, необходимы ли какие-либо функциональные преобразования факторов и зависимой переменной, например, логарифмическое преобразование площади водосборов, и для того, чтобы откорректировать границы района или учесть другие факторы, которые обуславливают отклонения данных в от-

дельных пунктах от общей однофакторной зависимости. Выбор функционального преобразования фактора осуществлялся, если коэффициент парной корреляции при этом преобразовании статистически значимо отличался от коэффициента парной корреляции прямолинейной зависимости. Статистически значимое отличие определялось следующим неравенством:

$$R_{\phi} > R_{np} + \sigma_R, \quad (14)$$

где: R_{ϕ} – коэффициент парной корреляции при рассматриваемом функциональном преобразовании фактора, R_{np} – коэффициент парной корреляции прямолинейной зависимости, σ_R – стандартная погрешность коэффициента корреляции прямолинейной зависимости [11].

На следующем этапе осуществляется построение уравнения множественной регрессии двумя методами: шаговой процедурой и методом исключения [12]. Шаговая процедура представляет собой улучшенный вариант метода включения. В этом методе включаются все переменные по очереди до тех пор, пока регрессионное уравнение не станет удовлетворительным. После того, как уравнение регрессии построено, оценивается значимость коэффициентов на основе их доверительных интервалов. Доверительные интервалы определяются на основе стандартной погрешности коэффициента уравнения регрессии σ_{B_j} , которая вычисляется по формуле:

$$\sigma_{B_j} = \sigma_{\epsilon} / (\sum (X_{ij} - X_{jcp})^2)^{1/2}, \quad (15)$$

где: σ_{ϵ} – стандартная погрешность остатков уравнения регрессии; X_{ij} – i-е значение j-го фактора; X_{jcp} – среднее значение j-го фактора.

Как правило, используются 95%-ные доверительные интервалы относительно вычисленного коэффициента уравнения регрессии B_j , которые соответствуют удвоенной стандартной погрешности σ_{B_j} и определяются следующим образом:

$$B_j - 2\sigma_{B_j} < B_j < B_j + 2\sigma_{B_j}. \quad (16)$$

Если верхняя и нижняя границы доверительного интервала одного знака, то коэффициент уравнения регрессии B_j является статистически значимым. Если они разного знака, то коэффициент B_j может принимать и нулевое значение, т. е. не является статистически значимым.

В результате в уравнении множественной регрессии остаются только те переменные, при которых коэффициенты являются статистически значимыми. В полученном статистически значимом уравнении оцениваются вклады каждой переменной, которые выражаются в % к общему описанию исходного рассеивания

полученным уравнением. Общее описание с помощью уравнения регрессии выражается в виде суммы квадратов, обусловленных регрессией или в виде разности суммы квадратов относительно среднего (исходное рассеивание) и суммы квадратов остатков.

При формировании региональных зависимостей и определении их коэффициентов могут рассматриваться следующие структуры уравнений:

- аддитивная структура уравнения в виде суммы аргументов с соответствующими коэффициентами, которая включает только преобразование площади водосбора в логарифм площади;
- структура, основанная на логарифмическом преобразовании, как площади водосбора, так и всех остальных факторов (аргументов);
- структура, основанная на логарифмическом преобразовании как функции, так и всех аргументов;
- мультипликативная структура, где, помимо отдельных слагаемых, задаются новые аргументы в виде произведения факторов как для исходных значений функции и аргументов, так и для их логарифмических преобразований;
- классическая структура редуцированной формулы, включающая два основных фактора: площадь водосбора и лесистость при логарифмическом преобразовании как функции, так и обоих аргументов.

В качестве примера ниже приведены полученные региональные зависимости в бассейне средней Ангары для максимальных в году 1%-ных модулей с учетом неоднородного генезиса формирования ($M_{1\%н}$):

$$\log M_{1\%н} = -0.246 \log A + 2.415 \log H - 11.087 \log \lambda + 19.061 \quad c R=0.85 \quad (17)$$

с вкладами факторов: 45,2% для $\log A$, 28,1% для $\log H$, 26,7% для $\log \lambda$ и стандартным отклонением остатков $\sigma_{\varepsilon} = 76,7$ л/с км².

$$M_{1\%н} = -135.3 \log A + 1107.6 \log H - 5860.8 \log \lambda + 9547 \quad c R=0.80 \quad (18)$$

с вкладами факторов: 54,7% для $\log A$, 17,2% для $\log H$, 28,1% для $\log \lambda$ и стандартным отклонением остатков $\sigma_{\varepsilon} = 87,4$ л/с км².

$$M_{1\%н} = 99.621 J_{рвзв} - 24.159 \lambda + 1.146 H + 2066.6 \quad c R=0.80 \quad (19)$$

с вкладами факторов: 67,1% для $J_{рвзв}$, 24,1% для λ , 8,8% для H и стандартным отклонением остатков $\sigma_{\varepsilon} = 87,4$ л/с км².

$$M_{1\%н} = 24.899 J_{рсп} * J_{рвзв} + 0.00963 H * f_{л} - 17.983 \lambda + 1606.6 \quad c R=0.85 \quad (20)$$

с вкладами факторов: 72,7% для $J_{рсп} * J_{рвзв}$, 14,2% для $H * f_{л}$, 13,1% для λ и стандартным отклонением остатков $\sigma_{\varepsilon} = 76,7$ л/с км².

Классическая редуцированная формула:

$$\log M_{1\%н} = -0.276 \log A + 1.792 \log f_{л} - 0.244 \quad c R=0.67 \quad (21)$$

$$\text{или } M_{1\%н} = f_{л}^{1.792} / 1.754 * A^{0.276},$$

с вкладами факторов: 73,9% для $\log A$, 26,1% для $\log f_{л}$ и со стандартным отклонением остатков $\sigma_{\varepsilon} = 108,1$ л/с км².

Методы оценки эффективности региональных зависимостей

Оценка эффективности полученных эмпирических зависимостей и формул, применяемых в гидрологических расчётах, выполняется на основе всестороннего анализа остатков, оценивания устойчивости параметров и коэффициентов этих зависимостей. Оценка эффективности является самостоятельным отдельным блоком региональной ГИС, т. к. применяется не только для вновь построенных региональных моделей, но для любых существующих формул, а также для любых других видов расчетов при наличии и недостаточности данных наблюдений.

Остатки любой эмпирической зависимости определяются как разности между фактическими (наблюденными) и расчетными значениями:

$$\varepsilon_i = Y_i - \check{Y}_i \quad (22)$$

где: Y_i – фактическое (полученное в результате наблюдений) значение, \check{Y}_i – рассчитанное по зависимости, ε_i – остаток или погрешность полученной зависимости.

В качестве безразмерной характеристики остатков могут рассматриваться их относительные значения (Δ_i):

$$\Delta_i = (Y_i - \check{Y}_i) / Y_i \quad (23)$$

которые выражаются в долях единицы или процентах.

Наиболее распространенной обобщенной характеристикой остатков является их среднее квадратическое отклонение (σ_i):

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{n-1}} \quad (24)$$

$$\text{или } \sigma_{\varepsilon} = \sigma_Y \sqrt{1 - R^2} \quad (25)$$

где: $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение остатков, R – коэффициент корреляции полученной зависимости, σ_Y – стандартное (среднее квадратическое) отклонение ряда фактических значений.

Стандартная погрешность дает первичную информацию об эффективности полученной эмпирической зависимости. В качестве обобщенной меры может служить также величина:

$$\Delta' = (1 - R^2) * 100\%, \quad (26)$$

которая характеризует долю исходного рассеивания (в %), не объяснённого с помощью построенной зависимости.

Стандартная погрешность остатков, как следует из (25) и (26), связана с коэффициентом корреляции полученного уравнения. Поэтому можно решать и обратную задачу: определить, каким должен быть коэффициент корреляции, чтобы уравнение удовлетворяло практической эффективности, например, по заданной стандартной погрешности стоковой характеристики, вычисляемой по уравнению (25). Если полученное уравнение имеет эффективность ниже, чем требуемая, то его можно попытаться улучшить путем введения новых факторов, изменения структуры зависимости и т. д. При этом необходимо иметь в виду, что практическая эффективность должна быть ориентирована на реальные возможности, связанные с погрешностями измерений и пространственно-временных обобщений факторов и определяемой стоковой характеристики, с ограниченностью объёма данных, множеством неучтенных факторов и т. д.

Всесторонний анализ остатков включает в себя оценивание:

- резко отклоняющихся экстремальных значений;
- смещённости остатков;
- случайности остатков на основе хронологического графика;
- случайности остатков в зависимости от каждого фактора, входящего в уравнение;
- случайности остатков в зависимости от расчётных значений.

Наличие смещённости остатков определяется тем, что среднее их значение не равно нулю или статистически значимо отличается от нуля. В уравнениях регрессии, коэффициенты которых определены по методу наименьших квадратов (МНК) или другими методами (единое решение, ортогональная регрессия), смещённость остатков

отсутствует. Как правило, наличие смещённости может иметь место для уравнений балансового вида (уравнение водного, руслового и других видов баланса), где невязки уравнений характеризуют как неучтенные факторы, так и все систематические погрешности составляющих. Смещённость остатков необходимо исключать или путем корректировки свободного члена уравнения, или тех коэффициентов и факторов, которые её обусловили.

Так как ряд зависимостей, применяемых в расчётах стока, строится по многолетним рядам стоковых характеристик и факторов (восстановление по аналогам, восстановление по рядам стокоформирующих факторов и т. д.), необходим анализ случайности остатков в зависимости от времени, который может осуществляться двумя путями:

- применение известных статистических критериев оценки случайности и стационарности (критерии Стьюдента, Фишера и другие);
- применение графического анализа остатков в зависимости от времени.

При случайном характере остатков от времени будет иметь место полоса рассеивания, параллельная оси нулевого значения. При неслучайном характере возможны следующие основные варианты:

- полоса разброса остатков сужается или расширяется, что связано с непостоянством дисперсии остатков во времени;
- полоса остатков имеет одинаковую ширину, но изменяется (линейно или нелинейно) в зависимости от времени, что свидетельствует о нестационарности средних значений остатков.

Установленная зависимость остатков от времени, как правило, обусловлена аналогичной зависимостью в одной или нескольких переменных уравнения. В этом случае необходимо искать причину нестационарности, её исключать (привести к стационарному виду) или учитывать.

Графики погрешностей строятся в зависимости от каждого фактора (X_i), входящего в уравнение. При этом возможны следующие ситуации:

- зависимость отсутствует и полоса остатков горизонтальна и симметрична относительно нулевого значения, что свидетельствует о случайности погрешностей;

- зависимость представлена сужающейся или расширяющейся полосой остатков от фактора, что свидетельствует о неоднородности дисперсии остатков, которую надо учитывать взвешенным МНК или предварительным преобразованием Y_i ;
- линейная зависимость остатков от фактора свидетельствует о том, что линейный эффект данного фактора в уравнении исключён неверно;
- нелинейная зависимость остатков от фактора свидетельствует о том, что в уравнение необходимо ввести нелинейные члены от X_i или произвести преобразование Y_i .

При построении зависимости остатков от расчётного значения Y_i возможны те же ситуации в полосах рассеивания, что при исследовании остатков от факторов.

Наиболее эффективной является проверка построенного эмпирического уравнения на независимом от расчёта материале наблюдений. В этом случае условия проверки соответствуют практическому применению установленных зависимостей. Для независимой проверки часть исходной информации не включается в построение уравнения и используется в качестве «эталона» для сравнения с расчётом. Анализ остатков в случае независимой проверки осуществляется теми же способами: на резко отклоняющиеся экстремумы, в зависимости от времени, факторов и расчётного значения. Необходимо отметить, что должен иметь место оптимум между количеством информации, используемой для построения зависимости и для её независимой проверки.

Литература

1. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004. 72 с.
2. СНиП 2.01.14-83. Определение расчётных гидрологических характеристик. М.: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1983. 97 с.
3. Ресурсы поверхностных вод (РПВ) СССР. Т. 1 Т. 20. Л.: Гидрометеиздат.
4. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.
5. Лобанов В.А., Никитин В.Н. Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов // Метеорология и гидрология. № 11. 2006. С. 60-69.
6. СНиП 10-01-94 «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения». Минстрой России, Москва, 1994. 21 с.
7. Лобанов В.А. ГИС в гидрологии // ГИС-обозрение. № 1. 2001. С. 54-59.
8. ВСН 163-83 Миннефтегазстрой. «Учет деформаций речных русел и берегов водоёмов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов)», Л.: Гидрометеиздат, 1985. 118 с.
9. Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical hydrology. UNESCO, International Hydrological Programme, IHP-IV M 2.3, Publ. No.23, The Netherlands, 1994. 243 p.
10. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерполяции метеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 359 с.
11. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
12. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.