



Евгений Александрович Шекман

В 2009 г. окончил географический факультет Дальневосточного государственного университета. С 2009 по 2012 г. обучался в очной аспирантуре Тихоокеанского института географии ДВО РАН по специальности «Геоморфология и эволюционная география». Научным руководителем является доктор географических наук Б.И. Гарцман. С 2012 г. работает младшим научным сотрудником лаборатории гидрологии и климатологии ТИГ ДВО РАН. В сферу научных интересов входят моделирование географических систем и их компонентов на основе пространственных геоданных, натурные исследования процессов формирования стоков в горных районах Приморского края, а также на юге криолитозоны. Основные направления работы – структурно-

гидрографическое моделирование речных систем, разработка методов анализа структурной организации речных бассейнов, оценка геоморфологических условий функционирования и развития речных систем. Результаты исследований неоднократно представлялись на конференциях различного уровня.

УДК 556.06:556.166+551.4:571.6

DOI: 10.25808/08697698.2019.206.4.015

Е.А. ШЕКМАН

Развитие методов моделирования структуры речных бассейнов на основе средств ГИС

Рассматривается использование комплексного энергетического индекса (Complex Energy Index – CEI) в целях параметризации условий формирования речной сети и развития на его основе методов структурно-гидрологического анализа речных систем и пространственной организации главных структурных элементов речного бассейна, речной сети и сети водоразделов в рамках единой порядковой концепции. Использование CEI для моделирования речной сети было апробировано в широком спектре физико-географических условий. Для порядковой классификации водоразделов сформулирован принцип определения порядка на основе путей стока с водораздела до замыкающего створа по звеньям русловой сети разных порядков. Использование единой порядковой концепции делает возможным усовершенствование типизации частных водосборов в зависимости от порядка водораздела.

Ключевые слова: речная сеть, морфология бассейна, порядки водотоков, порядковая классификация водоразделов, структурно-гидрографический анализ, цифровая модель рельефа.

Development of methods of modeling the structure of river basins based on GIS tools. E.A. SHEKMAN (Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok).

This article discusses about using the Complex Energy Index (CEI) to parametrize the conditions for the formation of the river network and the development on its basis of methods of structural and hydrological analysis of river systems

ШЕКМАН Евгений Александрович – младший научный сотрудник (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток). E-mail: shekman.e@gmail.com

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00353).

and the spatial organization of the main structural elements of the river basin, river network and watershed network, in framework of a single ordinal concept. The use of CEI for modeling the river network was tested in a wide range of physical and geographical conditions. For ordinal classification of watersheds, the principle based on drainage paths from the watershed to the closing line along the links of the river network of different orders was formulated. The use of a single ordinal concept makes it possible to improve the typification of elemental water collections depending on the order of the watershed.

Key words: river network, catchment morphology, stream orders, order classification of watersheds, structural and hydrographic analysis, digital elevation model.

Введение

Ключевой вопрос современной гидрологии – прогнозирование процессов формирования стока с использованием широкого спектра гидрологических моделей, оперирующих различными наборами данных. Основным «полигоном» моделирования служит речной бассейн как одна из ключевых составляющих природного каркаса территории, обладающая высокой определенностью пространственных границ.

В результате развития – динамического, эволюционного, катастрофического – в бассейне обособилась и функционирует взаимообусловленная и взаимосвязанная система природных компонентов, в том числе рек и водоразделов, объединенная в единое целое как совместным развитием в одних орографических границах, так и потоками энергии и вещества [5]. Еще в XIX в. был высказан тезис о том, что тесно связанные водоразделы и тальвеги являются главными структурами рельефа [10], определяющими эти потоки. Исходя из данного положения, под моделированием морфологической структуры речного бассейна мы подразумеваем корректное выделение как речной сети, так и системы водоразделов.

Современные подходы к моделированию гидрографической сети средствами ГИС опираются на обработку цифровых моделей рельефа (ЦМР) с применением различного рода индексов, необходимых для параметризации условий существования постоянного водотока на основе разных критериев. Эмпирическая зависимость между площадью водосбора и аккумулируемым стоком стала основой для широкого применения такого параметра, как пороговая площадь водосбора. Используются также и другие, более сложные индексы, оперирующие дополнительными морфометрическими и литологическими характеристиками.

Построение сети водоразделов в нашем случае является сопряженной задачей, выполнение которой полностью зависит от возможности корректной реализации моделирования речной сети.

Материалы и методы

Использование различного рода критериальных индексов считается стандартным подходом при моделировании речных систем средствами ГИС. В формулу расчета включаются параметризованные характеристики географической среды. Сами индексы обладают значительной степенью вариации, в зависимости от сочетаний природных условий в разных расчетных точках. Путем калибровки устанавливают пороговое значение, характеризующее такой результат сочетания закодированных в формуле расчета условий географической среды, при котором происходит формирование первичных звеньев гидрографической сети. Такой подход имеет существенные недостатки, несмотря на впечатляющие результаты в отдельных случаях. Большую проблему представляет неоднородность данных, неоднозначность их кодирования, поэтому в формулу расчета индексов включают наиболее удобные в использовании характеристики, при этом сложными частными особенностями пренебрегают. Но даже самые точные расчеты при моделировании водосборных бассейнов имеют общий недостаток – невозможность корректного учета

тектонических и палеогеографических особенностей развития. На фоне этих неопределенностей и сложности кодирования многих факторов географической среды широкое применение в качестве критерия выделения водотоков 1-го порядка получила эмпирическая зависимость между площадью водосбора и объемом стока.

В исследовании [11] выполнен анализ применения различных формул индексов, на основе которого авторы предлагают общую формулу индекса в виде:

$$a = \beta Q^m \Delta z^n, \quad (1)$$

где a – индекс, Q – расход водостока, Δz – местный уклон, β , m и n – параметры. Для конкретизации формулы 1 используются площадь водосбора (A) в качестве эквивалента расхода водостока:

$$Q_i^* \propto A_i, \quad (2)$$

а также известный в литературе индекс энергии рельефа (E):

$$E_i^* \propto A_i \Delta z_i. \quad (3)$$

Рациональной формулой, учитывающей пространственную неравномерность увлажнения, представляется усовершенствованный вариант индекса энергии:

$$E_i^* T = A_i (P - ET) \Delta z_i. \quad (4)$$

Здесь вместо показателя расхода водостока используется произведение площади водосбора на разность величин среднегодовых осадков (P) и среднегодового испарения (ET). Эффективность данной формулы индекса показана в работе [1] на примере ландшафтно-неоднородного бассейна р. Комаровка площадью около 1500 км². Информация о среднегодовых осадках значительно полнее и надежнее, чем данные по стоку. Данные по испарению также могут быть получены почти повсеместно расчетным путем на основе метеорологических наблюдений.

Приведенная формула индекса энергии, или комплексного энергетического индекса (CEI – *Complex Energy Index*), обеспечивает независимый учет основных характеристик оборота тепла и влаги, что позволяет проводить элементарные модельные эксперименты по реагированию речной сети на климатические изменения [2].

Базовым компонентом при моделировании речной сети средствами ГИС выступает ЦМР-покрытие. В качестве исходной информации для создания ЦМР используются топографические карты, аэрофотоснимки, космические снимки в оптическом и радиолокационном диапазонах спектра, данные воздушного лазерного сканирования, альтиметрической съемки, спутниковых систем позиционирования, нивелирования и другая геодезическая информация [6].

Выбор ЦМР основывается на задачах и масштабах выполняемых работ. Особую популярность при решении задач гидрологического моделирования получили глобальные ЦМР-покрытия SRTM и ASTER благодаря своей доступности и возможности их применения для большей части земной поверхности.

При подготовке ЦМР проводится предварительное перепроецирование раstra в картографическую проекцию, обеспечивающую наилучшее воспроизведение метрических характеристик речных систем и водосборных бассейнов. В зависимости от масштаба работ и пространственного разрешения исходных данных выбирается оптимальный размер квадратной ячейки раstra.

Для апробации методики моделирования структуры речного бассейна на основе CEI использовалось глобальное ЦМР-покрытие на основе данных SRTM 3 (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) с разрешением 3". Фрагменты покрытия были перепроецированы в равновеликую коническую проекцию Альберса с передискретизацией размеров ячейки раstra в 75 × 75 м.

Выбор исходных данных для расчета слоя осадков и испарения зависит от размеров моделируемого бассейна и плотности наземной сети наблюдения за метеорологическими характеристиками. В хорошо освоенных районах с высокой плотностью сети метеостанций целесообразно использовать растры распределения осадков и испарения, полученные на основе интерполяции данных многолетних наблюдений. При недостаточной обеспеченности метеорологическими данными в слабоизученных районах можно применять интерполированные данные с климатических карт или же цифровые глобальные растровые покрытия. Все данные подвергаются проецированию и дискретизации в соответствии с используемым ЦМР-покрытием.

Для получения фактических характеристик и пространственной привязки существующей речной сети выполнялась ручная оцифровка объектов гидрографии с топографических карт масштаба 1 : 100 000 с выделением речной сети в виде древовидного графа. Сформированный образ реальной речной сети использовался для визуального и статистического сравнения метрических характеристик с результатами, полученными на основе моделирования.

Для реализации модельных построений и расчетов использовался ГИС-пакет ArcMap.

Моделирование структуры речной сети и водоразделов

В качестве методической основы для моделирования речной сети было протестировано использование комплексного энергетического индекса, который представляет собой функцию от климатического стока и морфометрических условий рельефа в каждой точке бассейна. CEI обеспечивает независимую параметризацию геоморфологических и гидроклиматических условий формирования речной сети [1]. Учет геологических и литологических условий осуществляется путем калибровки оптимального порогового значения CEI, тем самым достигается максимальное соответствие реальной речной сети, полученной путем ручной оцифровки по топографическим картам масштаба, сопоставимого с разрешением используемой ЦМР.

Исходным этапом моделирования структуры бассейна в ГИС выступает расчет растра распределения значений индекса с последующим выделением на его основе речной сети и водоразделов.

Расчет растра распределения значений индекса выполняется по формуле 4. Перед расчетом направлений стока исходная ЦМР подвергается процедуре заполнения локальных бессточных понижений при помощи инструмента Fill (Заполнение) группы инструментов Spatial Analyst/Hydrology (Пространственный анализ/Гидрология). Локальные понижения заполняются для обеспечения более корректного выделения направлений стока и, как следствие, водосборных бассейнов и водотоков. Если локальные понижения не заполнены, выделенная дренажная сеть может иметь разрывы. Локальные понижения зачастую представляют собой небольшие ошибки, связанные с разрешением данных или округлением высот до ближайшего целого значения.

Полученное в результате обработки ЦМР-покрытие используется для расчета направлений стока инструментом Flow Direction (Направление стока) группы инструментов Spatial Analyst/Hydrology методом D8, при котором из каждой ячейки моделируется направление стока до соседней ячейки, расположенной вниз по склону с максимальным уклоном. Заполнение локальных понижений на предварительном этапе является необходимым условием для получения корректного растра распределения направлений стока.

Выражение $(P-ET)$ в формуле 4 представляет собой климатический сток и рассчитывается как простая разность двух растров – распределения осадков и испарения – инструментом Raster Calculator группы инструментов Spatial Analyst/Map Algebra.

Инструмент Flow Accumulation (Суммарный сток) группы инструментов Spatial Analyst/Hydrology использует полученный на предыдущем этапе растр распределения

направлений стока и вычисляет суммарный сток как взвешенную сумму всех ячеек, сток из которых попадает в каждую ячейку вниз по склону выходного растра. Если не предоставлено растра весов, каждой ячейке назначается вес 1, а значение ячеек выходного растра равно количеству ячеек, выпадающих в каждую последующую ячейку. Данный принцип положен в механизм вычисления площади водосбора.

Если использовать полученный на предыдущем этапе растр ($P-ET$) в качестве параметра веса (weigh raster) в каждой точке исходного растра, то в результате процедуры получается слой значений суммарного климатического стока в каждой точке растра, эквивалентный записи $A_i(P-ET)$ в формуле 4. Недостающее значение Δz_i рассчитывается при помощи инструмента Slope (Уклон) группы инструментов Spatial Analyst/Surface. Выходной растр уклонов может быть вычислен в двух единицах измерения – градусах или процентах. Для простоты расчеты целесообразно вести в процентах. Инструмент работает на основе данных о высотах. Для сохранения единообразия обрабатываемой информации вместо исходной ЦМР рекомендуется использование результата ее обработки процедурой Fill (Заполнение). Инструмент подбирает плоскость для значений из области размером 3×3 ячейки вокруг обрабатываемой или центральной ячейки. Значение уклона этой плоскости вычисляется с помощью методики усредненного максимума.

Вычисление растра распределения значений CEI выполняется инструментом Raster Calculator путем перемножения значений растра суммарного климатического стока на растр уклонов. При этом обе перемножаемые величины переводятся в метрическую систему: локальный уклон – из процентов в доли простым делением на 100, а климатический сток – в кубические метры.

Построение модели речной сети. Модель структуры речной сети строится путем задания порогового значения индекса с использованием инструмента Raster Calculator при помощи функции Con (Условие). В результате выделяются ячейки растра со значениями CEI больше заданного. Так, при расчете индекса в качестве одного из множителей берется уклон с нулевым значением в тальвегах водотоков на отдельных ячейках растра, поэтому возникают большие локальные вариации индекса, которые обуславливают разрывы в полученной растровой модели. Это не позволяет использовать ее напрямую для создания связанной векторной модели, как в случае с заданием пороговой площади водосбора. Устранение разрывов осуществляется путем задания полученного растра в качестве «веса» при применении инструмента Flow Accumulation.

Результат суммирования обрабатывается инструментом Set Null (Установить Null) группы инструментов Spatial Analyst/Conditional с заменой всех ячеек, не равных нулю, на единицу. В результате получаем связанный растр моделированной речной сети, в которой первичные водотоки начинаются от точек, где впервые (по линии стока) значение CEI превысило заданное.

Полученный растр представляет собой модель линейной сети водотоков, в отношении которой последовательно применяется стандартный набор группы инструментов Spatial Analyst/Hydrology – Stream Link (Идентификация отдельных сегментов водотоков), Stream Order (Определение порядков), Stream to Feature (Преобразование в пространственный объект).

Подбор оптимального значения индекса. Приведенный выше перечень процедур обработки растра распределения значений CEI является стандартным набором инструментов ГИС-пакета ArcMap с возможностью запуска при помощи Model Builder данной последовательности действий в автоматическом режиме итерации значений индекса для подбора оптимального значения (рис. 1).

При калибровке полученная в результате ручной оцифровки гидрографии с топографических карт масштаба 1 : 100 000 речная сеть сравнивалась с моделируемой по визуальным критериям (пространственное положение речной сети и основных узлов слияния, густота) и статистическим характеристикам: общему числу звеньев речной сети (общему числу водотоков 1-го порядка; суммарной протяженности речной сети; суммарной

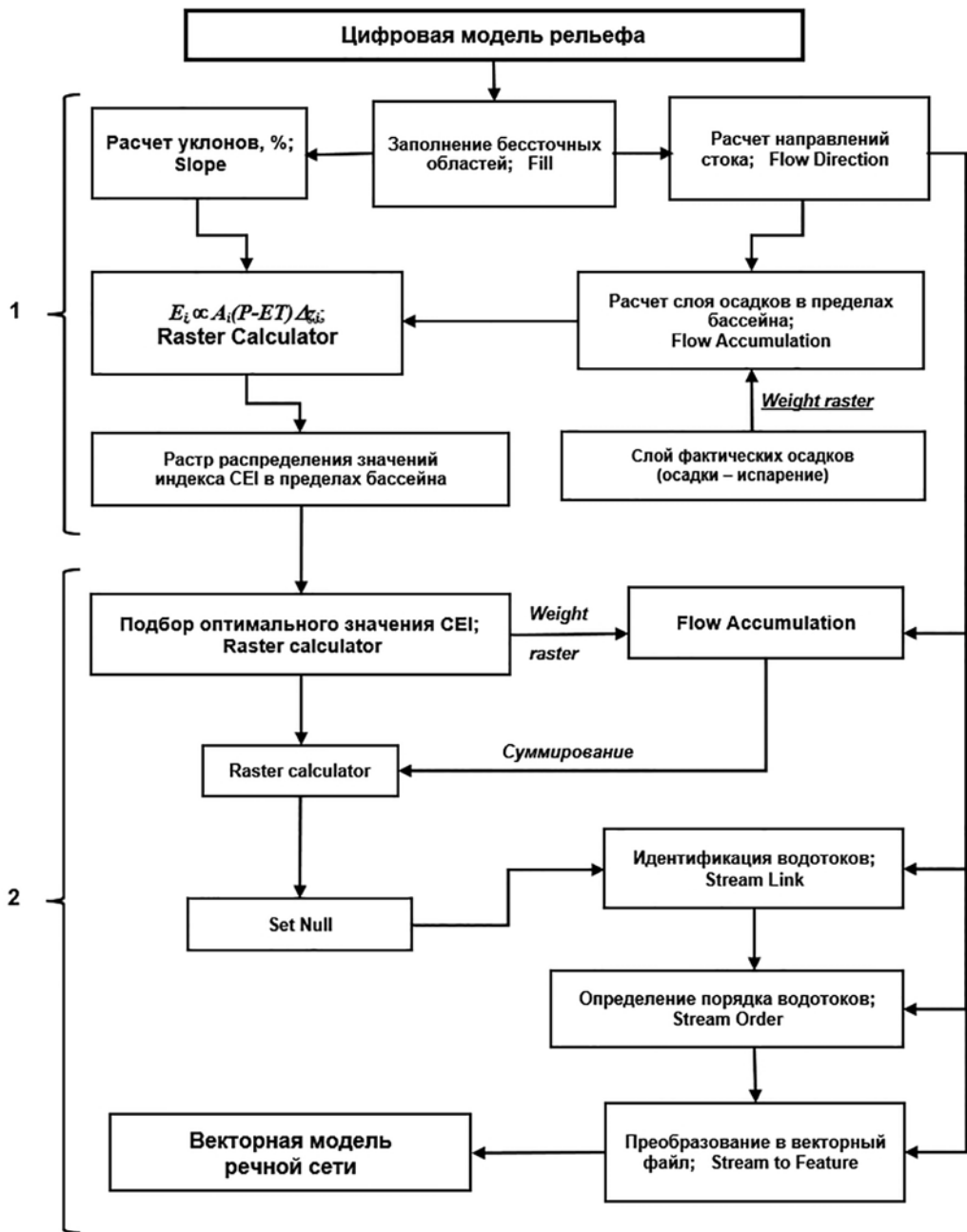


Рис. 1. Блок-схема моделирования речной сети с использованием CEI (блок 1 – расчет растра распределения значений индекса, блок 2 – калибровка оптимального порогового значения)

протяженности водотоков 1-го порядка). Оптимальным признается значение индекса, при котором отклонение параметров моделируемой речной сети от статистических характеристик реальной сети минимально.

Если при визуальном сопоставлении выявляются участки речного бассейна с существенными различиями густоты речной сети, несовпадением порядковой структуры, то, как правило, такие различия обусловлены значительными неоднородностями геологического и морфотектонического строения. Данные особенности не учитываются формулой

расчета индекса. Указанные характеристики, наряду с палеогеографическими особенностями развития, представляют существенные трудности для корректного моделирования структуры речной сети, и возможности их параметризации или же математического описания взаимосвязи с процессами формирования стоков средствами ГИС-технологий остаются неопределенными. В подобных случаях проблема получения корректной модели речной сети решается путем независимой калибровки геологически однородных областей речного бассейна.

Моделирование водоразделов и их классификация. Речная сеть и водоразделы являются структурообразующими компонентами природно-экологического каркаса речного бассейна. Моделирование корректной структуры водоразделов находится в тесной взаимосвязи с возможностью корректного воспроизведения структуры речной сети.

Речной бассейн как целостная геоморфологическая система рассматривается в работах Р. Хортон [8] и А. Шоллея [9]. Традиционные методы определения порядка водораздельных линий и анализа их структурной организации были предложены В.П. Философовым [7] и базировались на использовании разномасштабных топографических карт.

Применение ЦМР для моделирования сети водораздельных линий облегчает данную задачу, но при этом, в отличие от моделирования речной сети, отсутствует единообразие подходов как к самому моделированию, так и к построению порядковой классификации. Прежде всего, не существует общепринятого программного средства для выделения сети водораздельных линий. Кроме того, использование традиционной классификации при определении порядка водораздельных линий аналогично порядку речных долин не совсем корректно, так как гидрографическая и водораздельная сети являются принципиально разными объектами не только в плане физико-географических особенностей, но и по своей структуре. В отличие от водотоков, каждый из которых естественным образом связан с собственным водосбором, тот или иной участок водораздела в общем является границей многих вложенных друг в друга водосборов разных размеров и порядков.

В качестве альтернативы традиционному подходу предлагается порядковая классификация водоразделов Хортон–Стралера на основе последовательности пути стока по гидрографической сети от водораздела до замыкающего створа. Например, порядковая последовательность для водораздела бассейна реки 5-го порядка в виде $x_5 - x_4 - x_3 - x_2 - x_1$ будет означать водораздел 5-го порядка, сток с которого проходит через речную сеть всех возможных порядков, а последовательность $x_5 - x_0 - x_0 - x_2 - x_1$ будет соответствовать водоразделу реки 2-го порядка, впадающей, минуя водотоки 3- и 4-го порядков, в главную реку 5-го порядка. Таким образом обеспечивается обоснованное соответствие структуры и порядковой классификации гидрографической и водораздельной сетей [3].

Построение сети водоразделов реализуется посредством ряда технических приемов, позволяющих обеспечить принцип их порядковой классификации, сопряженный с порядковыми характеристиками соответствующей им речной сети. Исходным материалом для построений выступает растровая древовидная модель речной сети, полученная и откалиброванная по оптимальному значению CEI.

Для сохранения как уникального идентификатора, так и порядковой характеристики при последующем построении частных водосборов значение индекса порядка сначала умножается на 10^n , где n превышает разрядность максимального идентификатора сегментов речной сети, а затем суммируется с растром, где каждый сегмент речной сети имеет уникальный идентификатор. Данная процедура легко выполняется при помощи Raster Calculator. В ячейках результирующего растра получают значения сводного индекса, содержащего как индивидуальный номер водотока, так и его порядок. Например, значение 6001962 означает, что ячейка принадлежит водотоку номер 1962, имеющему 6-й порядок по Хортону–Стралеру. Индекс данного вида с использованием инструмента Extractly Attribute (Извлечь по атрибутам) группы инструментов Spatial Analyst/Extraction (Пространственный анализ/Извлечение) позволяет последовательно вычленить наборы отдельных сегментов речной сети каждого порядка. Полученные растры последовательно

используются в качестве замыкающих створов для инструмента Water Shed (Водосборная область) группы инструментов Spatial Analyst/Hydrology.

Получаются растровые мозаики частных водосборов, каждый частный водосбор наследует значение сводного индекса связанного с ним водотока, которое помещается в каждую ячейку соответствующего частного водосбора.

Выделение граничных (приводораздельных) ячеек раstra частных водосборов производится с помощью инструмента Focal Statistics (Фокальная статистика) группы инструментов Spatial Analyst/Neighborhood (Пространственный анализ/Окрестность), позволяющей получить суммы значений всех ячеек, непосредственно прилегающих к заданной. Так как ячейки, принадлежащие одному частному водосбору, содержат одинаковые значения, то для всех внутренних ячеек этого водосбора результат применения процедуры будет давать одни и те же значения, а для всех ячеек на границах с соседними водосборами – другие значения. Это дает возможность различить и с помощью инструментов Spatial Analyst/Map Algebra/Raster Calculator и Spatial Analyst/Conditional/Set Null отделить ячейки, расположенные в непосредственной близости к водоразделам.

Обработка выполняется последовательно для растровых мозаик частных водосборов каждого порядка. Далее полученные растровые данные подвергаются процедуре Spatial Analyst/Reclass/Reclassify с присвоением приводораздельным ячейкам значений $N \cdot 10^{N-1}$, где N – порядок растровой мозаики частных водосборов. Например, все приводораздельные ячейки частных водосборов 1-го порядка получают значение 1, 2-го порядка – значение 20, 3-го порядка – значение 300 и так далее. Всем остальным ячейкам присваивается значение 0 для обеспечения возможности корректного суммирования полученных растровых данных при помощи Spatial Analyst/Map Algebra/Raster Calculator .

Результаты и обсуждение

С использованием комплексного энергетического индекса была смоделирована и откалибрована речная сеть для 16 бассейнов, расположенных в широком диапазоне климатических и геоморфологических условий в пределах юга Дальнего Востока [3]. Для калибровки значений и визуального сопоставления результатов применялся векторный слой, полученный путем оцифровки речной сети, отраженной на карте масштаба 1 : 100 000, что сопоставимо с разрешением используемой ЦМР.

При сравнении полученных моделей с реально существующей речной сетью установлен ряд закономерностей, которые позволяют говорить об отдельных доминирующих факторах развития речной сети на определенных участках. Эти факторы носят, как правило, исторический характер и демонстрируют несостоятельность математических подходов к моделированию в рамках длительной эволюции физико-географического объекта.

Несоответствие модели реальной гидрографической сети имеет отчетливую корреляцию с участками перестройки речной сети в прошлом. Ввиду того что существуют значительные различия в интенсивности воздействия тех или иных факторов формирования речной сети во времени, а речная сеть является унаследованным результатом условий прошлого, модель во многом характеризует современные тенденции ее развития. При этом моделируемая речная сеть демонстрирует высокую степень соответствия структуры и планового положения основных узлов слияния в пределах равновесных речных бассейнов.

Использование в формуле расчета индекса климатического стока позволило существенно нивелировать расхождения, связанные с неоднородностью ландшафтных и климатических условий в пределах бассейнов.

На основе моделей речной сети на примере нескольких речных бассейнов была протестирована предложенная методика порядковой классификации.

Использование полученных последовательностей в чистом виде представляет определенную сложность ввиду наличия большого числа вариаций. Так, для речного бассейна

n -го порядка число вариантов последовательностей будет равно 2^{n-1} . Для бассейна 8-го порядка это дает 255 теоретически возможных комбинаций, поэтому порядок n присваивается участку водораздела, принадлежащему полной водораздельной линии бассейна n -го порядка при условии, что путь «добегания» от него до водотока n -го порядка является «полным», минуя все промежуточные порядки.

Полученная сеть водоразделов показывает, что водоразделы старшего порядка, несмотря на их сегментированность на некоторых участках, отчетливо оконтуривают отдельные области речных бассейнов, однородные по характеру рельефа, уклонов, геологическому строению, рисунку гидрографической сети. Другой важной особенностью сегментированности водораздела старшего порядка, как в случае бассейна р. Усури (рис. 2), является то, что в прошлом на участках крупных разрывов происходили существенные плановые перестройки речной сети с перераспределением стока в пользу противоположного макросклона [4].

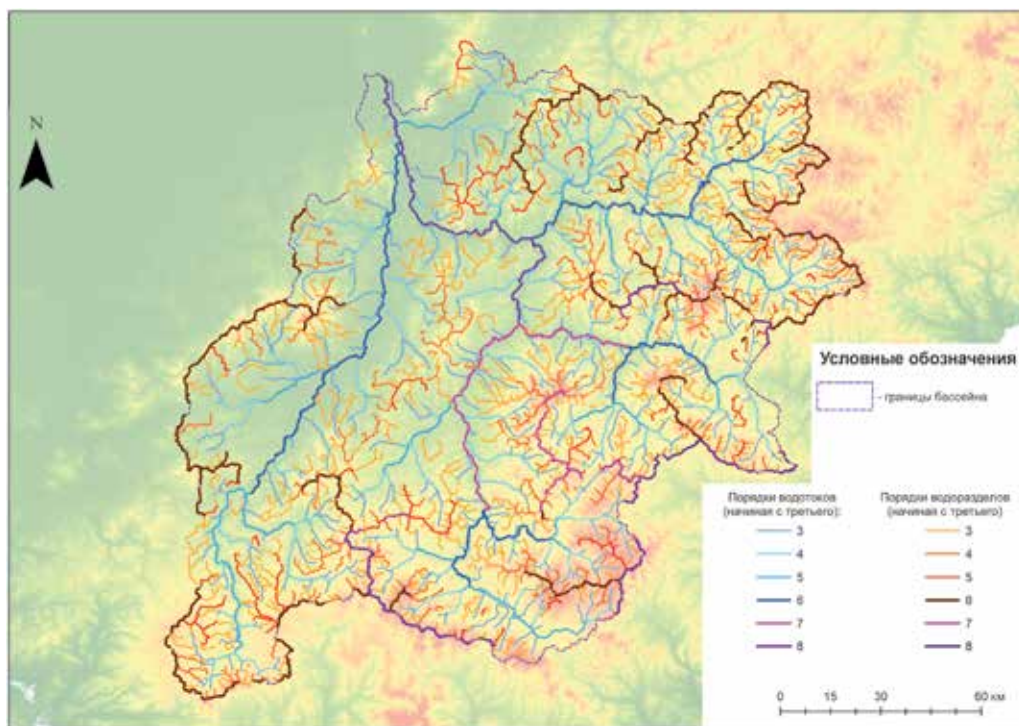


Рис. 2. Порядковая структура речной сети и водоразделов старших порядков бассейна р. Усури

Описание речной сети и водоразделов в рамках единой порядковой концепции позволяет использовать порядковые характеристики водоразделов для уточнения типизации частных водосборов одного порядка.

Выводы

Предлагаемая формула расчета комплексного энергетического индекса, используемого для построения цифровых моделей речной сети, не учитывает в явном виде литологические и геологические особенности территории, в связи с чем возникают сложности при реализации моделей для крупных неоднородных речных бассейнов. В этом случае необходимы отдельное зонирование речного бассейна и независимая калибровка для разных его частей. Данное обстоятельство не представляет существенной проблемы, так как все

построения реализованы в рамках единого программного алгоритма и не требуют больших трудозатрат на подготовку. Предлагаемый индекс обеспечивает удовлетворительные результаты построений для всех речных бассейнов и имеет перспективы для дальнейшего использования с применением дополнительных наборов геоданных.

Также перспективным представляется использование видоизмененного слоя осадков как одного из инструментов прогноза поведения эрозионной сети при разных климатических сценариях.

Процедура выделения и классификации водоразделов требует дополнительной отладки в связи с невозможностью полной автоматизации. Дополнительная сложность заключается в использовании в качестве основы растра, на котором система водоразделов представлена в виде приводораздельных пикселей, лежащих на границах разных бассейнов. Достаточно часто подобные водоразделы имеют разный порядок по разные стороны, и с их классификацией возникают определенные трудности.

Разработка и использование взаимосвязанной порядковой классификации водотоков и водоразделов позволяют уточнить особенности иерархической организации частных водосборов речного бассейна и осуществить более детальную типизацию частных водосборов с использованием порядка водораздела, который характеризует его морфологические и функциональные особенности. На этой основе можно усовершенствовать параметризацию пространственно распределенных гидрологических моделей, особенно в слабоизученных регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2013. № 1. С. 136–147.
2. Гарцман Б.И., Шекман Е.А. Возможности моделирования речной сети на основе ГИС-инструментария и цифровой модели рельефа // Метеорол. и гидрология. 2016. № 1. С. 86–98.
3. Гарцман Б.И. и др. Порядковая классификация речных водоразделов на основе обработки цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2016. № 4. С. 164–173.
4. Короткий А.М., Коробов В.В. Перестройка речных систем и устойчивость водосборных бассейнов Сихотэ-Алиня // Изменения климата, природные катастрофы и становление ландшафтов юга Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 55–68.
5. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск.: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2001. 163 с.
6. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2017. 148 с.
7. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1975. 232 с.
8. Хортон Р. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: ИЛ, 1948. 156 с.
9. Шоллей А. Структурная и климатическая геоморфология // Вопросы климатической и структурной геоморфологии. М.: Иностр. лит., 1959. С. 11–31.
10. Cayley A. On contour and slope lines // London, Edinburgh and Dublin Philosoph. Mag. and Journ. Sci. 1859. Vol. 18, № 4. P. 264–268.
11. Rodrigues-Iturbe I., Rinaldo A. Fractal River Basin. Chance and self-organization. Cambridge: Univ. Press, 1997. 547 p.