

степень развития современной сети по отношению к потенциально возможной, выявить территории с практическим затуханием процесса или обозначить территории, где усиление антропогенной нагрузки может активизировать появление новых и развитие существующих оврагов в настоящее время не представляющих опасность. Представляется возможным выявление зоны не проявляющейся эрозии, на которой наиболее целесообразно возведение инженерных сооружений, прокладка дорог и коммуникаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорина Е.Ф. Овражная эрозия: закономерности и потенциал развития. М.: ГЕОС, 2003. 169 с.
2. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противозерозионных мероприятий на Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 62 с.
3. География овражной эрозии М.: Изд-во МГУ, 2006. 324 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
01.02.2011

PROBABILITY AND “RISK” OF GULLIES FORMATION

E.F. ZORINA, I.I. NIKOL'SKAYA, S.D. PROKHOROVA, T.S. DAIKOVSKAYA

Summary

An assessment of gully erosion hazard on slope catch basins of small rivers and balkas was fulfilled using the method of extreme parameters calculation. Potential gullies length was calculated what helped to divide slope catch basins into “gully-generating” and “gully-non-generating”. The degree of number- and length-realizations was evaluated for each gully-generating catch basins as well as the possible increment of gully network length. An approach to assessment of “risk” was suggested. The probability of gully rise was calculated using morphometric characteristics of slope catch basins obtained from topographical maps.

УДК 551.4.012 → 556.535.6

© 2012 г. **О.П. ЕРМОЛАЕВ, К.А. МАЛЬЦЕВ, В.В. МОЗЖЕРИН, В.И. МОЗЖЕРИН**

ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА “СТОК ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ ЗЕМЛИ”¹

Развитие геоморфологии в последние десятилетия идет по пути все более усиливающихся разработок динамической направленности [1–3]. Морфологическая парадигма постепенно сменяется динамической, что объективно отражает более глубокое проникновение в физическую и химическую сущность и механизмы рельефообразования, в факторы и законы, управляющие перемещением вещества. Только создание единой динамической концепции морфогенеза способно объединить многочисленные достаточно разнородные и во многом изолированные теоретические обобщения современной геоморфологии, содействовать разработке общей модели рельефообразования, сопоставимой с аналогичными теориями классической геоморфологии, и расширить области практического приложения геоморфологических исследований.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-05-00489 и 11-05-00605) и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы” (проект № 8470; П347).

Усиление динамических аспектов в современной геоморфологии сопровождается существенной сменой применяемых методов исследований. Резко возрастает роль количественных оценок интенсивности рельефообразующих процессов и их морфологических последствий, все большее значение приобретают стационарные наблюдения и эксперименты, включая численные, расширяются возможности математического и геоинформационного моделирования, в том числе в рамках системного подхода [4]. С этих позиций особой становится роль комплексных исследований экзогенных (и в первую очередь – эрозионно-аккумулятивных) процессов внутри речных бассейнов, являющихся ярко выраженным геосистемным образованием.

Многофакторность экзогенных процессов во многом предопределяет большую пространственно-временную изменчивость их спектров (набора и интенсивности). Наиболее простой способ оценки этой изменчивости заключается в изучении стока наносов рек, который в первом приближении можно соотнести с величиной транзитной денудации всего речного бассейна. Транзитный вынос материала, не являясь точной мерой всех перемещаемых продуктов рельефообразующих процессов в речном бассейне, прямо связан с активностью комплекса процессов механической и химической денудации. Он позволяет дать относительную оценку этой активности для разных территорий и может служить средством контроля при изучении и прогнозе скоростей как отдельных процессов, так и их совокупностей на экстерриториальном и даже глобальном уровне. Вместе с тем, в соответствии с принципом актуализма данные по современному стоку наносов рек и транзитной денудации применимы для решения многих классических задач геоморфологии, связанных с установлением возраста и происхождения рельефа, функционированием геоморфологических режимов и систем экзогенного рельефообразования.

Материалы по стоку наносов рек обладают целым рядом черт, ставящих их в особое положение при изучении экзогенных процессов и транзитной денудации. Они являются количественными, полученными по сходным, во многом унифицированным методикам за длительный период наблюдений и отличаются широким территориальным охватом, характеризую интенсивность современного морфогенеза в самых различных условиях. По самым грубым оценкам, общемировое количество пунктов, в которых проведены или продолжают проводиться наблюдения за стоком наносов, составляет около 10 тысяч, но из них порядка 6 тысяч по разным причинам (очень краткий период наблюдения, отсутствие морфометрических и гидроморфологических характеристик бассейна, ненадежность или недоступность сведений и проч.) непригодны для геоморфологического анализа. Таким образом, к настоящему времени введенными в научный оборот можно считать лишь опубликованные материалы режимных наблюдений за стоком рек национальных гидрологических служб по примерно 4 тысячам постов, располагающихся большей частью на территориях бывшего СССР, США, Канады, ФРГ и некоторых других стран Западной Европы. Эти материалы включают в себя многолетние величины выноса вещества и разнообразные сведения об условиях его формирования.

Пространственно-временной анализ структуры и интенсивности денудации в глобальном масштабе на основе данных по стоку наносов позволяет оценить не только общий геоморфологический эффект этого процесса в рельефообразовании, но и понять вклад природных и антропогенных составляющих в его трансформацию. Между тем количественный анализ вклада различных факторов и процессов в общую величину стока наносов до настоящего времени по целому ряду причин проведен только в самых общих чертах как в России, так и за рубежом. Создание моделей систем эрозии и экзогенного рельефообразования в целом для различных ландшафтных зон Земли возможно только на основе привлечения массового количественного материала. Учитывая глобальный масштаб исследования, эта задача может быть решена лишь с привлечением современных информационных технологий, основой которых являются геоинформационные системы (ГИС).

В настоящее время в Казанском университете проводятся исследования, которые являются логическим продолжением работ по изучению глобального стока наносов, начатых еще в середине 1970-х гг. А.П. Дедковым и В.И. Мозжериным [5]. Главная цель этих работ на текущем этапе заключается в создании специализированной ГИС глобального уровня “Сток взвешенных наносов в речных бассейнах Земли” для количественной оценки и пространственно-временного геоморфологического анализа систем эрозии и экзогенного рельефообразования на Земле.

На сегодняшний день известна, по меньшей мере, одна глобальная ГИС, предназначенная для изучения пространственного распределения величины стока взвешенных наносов [6]. Однако она создавалась для оценки общего выноса твердого материала с континентов в Мировой океан, и в ее основе лежат данные лишь о замыкающих сворах, расположенных перед впадением рек в океанические акватории. Кроме того, существуют достаточно многочисленные национальные гидрологические ГИС, поддерживаемые на территории отдельных (преимущественно западноевропейских) государств. Все большую популярность приобретают международные проекты (например, европейские программы Рамочной директивы по водной среде, EU Water Framework Directive).

Создание глобальной ГИС включает ряд взаимосвязанных этапов. Во-первых, разработку программного обеспечения, позволяющего на основе существующих цифровых моделей рельефа (ЦМР) Земли получить количественные данные о современном рельефе планеты (в частности, его морфометрии), в автоматизированном режиме построить границы водосборов, располагающихся в различных орографических условиях, и определить их порядок. Во-вторых, формирование глобальной системы операционно-территориальных единиц, представленных бассейновыми геосистемами двух типов: планарными бассейнами определенного порядка и бассейнами, по которым ведутся наблюдения за стоком наносов. В-третьих, составление геопространственной базы на бассейны рек Земли, включающей данные по стоку взвешенных наносов и контролирующим его факторам (гидрометеорологическим, ландшафтным, геолого-геоморфологическим, антропогенным и проч.), привязанным к бассейнам. В-четвертых, разработку и адаптацию методики автоматизированного тематического и комплексного районирования на основе искусственных нейронных сетей. И, наконец, в-пятых, создание комплекта электронных тематических карт (своеобразного тематического атласа), отражающих изменчивость и факторную обусловленность величины стока наносов и транзитной денудации в речных бассейнах Земли.

По вполне понятным причинам, даже при условии хорошего информационного обеспечения по всем компонентам ГИС, работа по ее созданию является чрезвычайно сложной задачей как по трудозатратам, так и с методической точки зрения. Поэтому на первом этапе нами выполнены исследования по территории северной Евразии (в пределах бывшего СССР), выбранной в качестве экспериментальной в силу исключительно высокой степени гидрологической изученности: здесь охарактеризованы почти 2000 бассейнов рек, в которых проводились наблюдения за стоком наносов. На рисунке 1 показана пространственная обеспеченность рассматриваемой территории данными прямых наблюдений за стоком наносов. В последующем территориальный охват ГИС будет расширен до заявленного глобального уровня.

Формирование системы бассейновых единиц в создаваемой геоинформационной системе является принципиально важной задачей, поскольку вся информация отнесена к бассейнам. Поэтому имеет смысл остановиться более подробно на отдельных аспектах ее решения.

В контексте ГИС рельеф представляется как цифровая модель, или поле высот, в сеточном (GRID) или векторном выражении. В нашем исследовании предпочтение отдано первой модели. Хотя векторный формат обладает некоторыми неоспоримыми преимуществами по сравнению с сеточными моделями, он имеет один существенный недостаток, заключающийся в исключительной сложности проведения аналитических

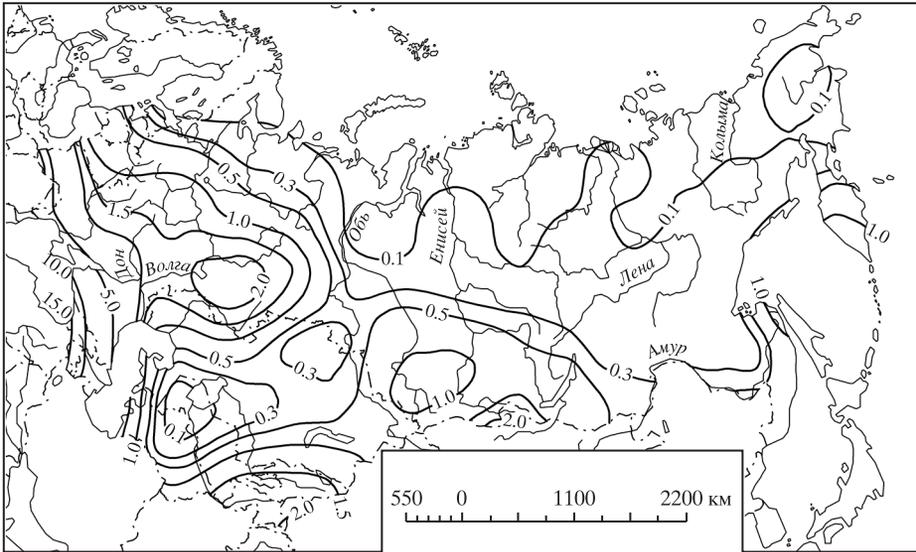


Рис. 1. Обеспеченность территории северной Евразии (в пределах бывшего СССР) наблюдениями за стоком взвешенных наносов
 Изолинии характеризуют количество постов на 10 тыс. км²

операций. Немаловажным является также отсутствие верифицированных векторных моделей рельефа глобального масштаба.

В настоящее время существует довольно большое количество национальных и международных сеточных моделей рельефа Земли. Однако одной из наиболее популярных и доступных для исследователей до настоящего времени остается цифровая модель GТор30, которая была нами положена в основу решения задач по автоматизированному выделению границ водосборных бассейнов. Модель GТор30 получена Геологической службой США в результате сведения в единую базу самых разнообразных материалов, начиная от данных с топографических карт и заканчивая данными космических съемок. Окончательная модель, доступная для пользователей, появилась в 1996 г. Пространственное разрешение модели составляет 30 угловых секунд, что на экваторе соответствует осреднению высот земной поверхности на площади в 1 км², а в умеренных широтах – в 0.7 км². Исходя из того, что наименьшая площадь водосборного бассейна, имеющего наблюдения за стоком наносов, составляет больше 6 км², выбор модели GТор30 вполне обоснован. Вся модель содержит 21 600 строк и 43 200 колонок, приведенных к нормальной цилиндрической проекции с квадратной сеткой в мировой системе координат WGS 84; она включает в себя сведения о высотах поверхности практически всей суши Земли, в то время как многие другие модели большего разрешения имеют существенные территориальные ограничения. Модель GТор30 удобна также в том отношении, что относительная подробность сведений о высотах рельефа в ней сочетается с достаточной компактностью объема цифровой информации. Многие другие глобальные и семиглобальные ЦМР с более высоким пространственным разрешением (например, SRTM или ASTER DEM), имея бóльшую детальность, обладают объемом, затрудняющим их практическое использование в создании предлагаемой глобальной ГИС.

В совокупности с этими данными было использовано программное обеспечение “TAS” (Terrain Analysis System), разработанное Дж. Линдсеем (университет Западного Онтарио, Канада) [7]. Основное назначение этого программного продукта заключается в формализованном гидролого-морфометрическом анализе сеточных моделей рельефа, включая процедуру автоматизированного определения границ речных бассейнов.

Эту процедуру в свою очередь можно разделить на две группы операций: во-первых, подготовку исходных данных для автоматического построения бассейнов и, во-вторых, работы, связанные непосредственно с построением границ поверхностных водосборных бассейнов.

Подготовка исходных данных подразумевает первоначальное устранение незадаанных значений высот, резко увеличивающих время обработки модели. Далее изменяется само поле высот рельефа таким образом, чтобы удалить бессточные области внутри речных бассейнов. На исходной модели всегда присутствует большое количество небольших локальных западин, на которых в силу используемых алгоритмов прерываются линии потоков поверхностного стока, что ведет в свою очередь к некорректному построению границ водосборных бассейнов и значительному искажению их площадей.

Затем производится расчет положения и ориентировки тальвегов, используемых в дальнейшем для построения модели временной и постоянной речной сети. Алгоритм расчета основан на поиске вокруг каждого узла сетки узла-соседа с минимальным значением высоты, в направлении которого и будет ориентирован поток. Одновременно с нахождением тальвегов рассчитывается модель водосборной площади, представляющая собой дополнительную GRID-сетку, в каждой ячейке которой хранится значение дренируемой в данной точке площади земной поверхности.

Результатом предобработки исходных данных является модель речной сети, точнее сети тальвегов различной длины, которая необходима для дальнейшего определения границ речных бассейнов. В основе ее построения лежат модели направлений потоков и модель водосборных площадей, созданные на предыдущем этапе. Для различения постоянных и временных водотоков, соответствующих выделенным тальвегам, использовалось эмпирическое предположение, что постоянным водотоком является сегмент сети тальвегов, дренирующий площадь не менее 6 км² (размер минимального бассейна) и длиной не менее 3 км. Принятые пороговые значения проверялись на контрольных участках, обеспеченных среднemasштабными картами. За редким исключением общие очертания речной сети на топографических картах среднего масштаба и полученные нами в ходе моделирования обнаруживают хорошее соответствие.

В завершении выполняется построение границ бассейнов для гидрологических постов, ведущих наблюдения за стоком наносов (рис. 2). Оценка точности построения системы речных бассейнов осуществлялась в двух вариантах: качественно (на картах визуально оценивалось правдоподобие выделения границ водосборных бассейнов) и количественно (производилось статистическое сравнение площадей водосборов, построенных автоматически, с опубликованными данными по площадям тех же водосборов). Выявленные погрешности не носят систематического характера и для европейской части России, например, в среднем не превышают 5–7%.

Следующий этап создания ГИС заключается в привязке к каждому речному бассейну информации из банка данных по стоку наносов и контролирующим его факторам. Основу банка составляют сравнительно однородные сведения, опубликованные в гидрологических справочниках и в обобщающей монографии А.П. Дедкова и В.И. Мозжерина [5]. Вместе с тем, объем банка существенно расширен в области характеристики условий формирования речного стока наносов. Введены климатические параметры, дополнены данные о характере и структуре ландшафтов и степени сельскохозяйственной освоенности речных бассейнов на основе архивов космических снимков, полученных в период наблюдений за стоком наносов, добавлены некоторые принципиально новые сведения с обзорных тематических карт. Насколько можно судить, предлагаемая глобальная геоинформационная система и сопряженный с ней банк данных являются самыми крупными в мире массивами гидролого-геоморфологической информации о стоке наносов и условиях его формирования не только по количеству речных бассейнов, но и по числу учтенных характеристик.

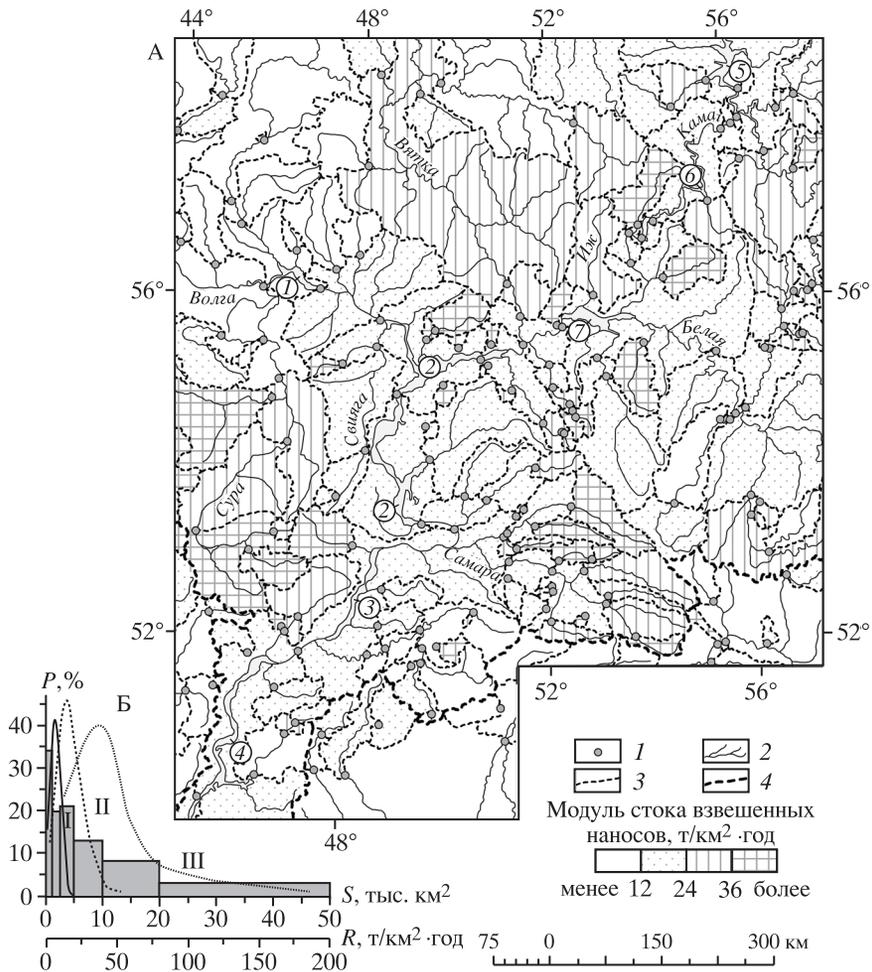


Рис. 2. Изменчивость модуля стока взвешенных наносов по речным бассейнам, выделенным в автоматизированном режиме для постов, ведущих наблюдение за стоком взвешенных наносов, на территории Среднего Поволжья (А) и процентное распределение речных бассейнов (P) по их площади (S ; гистограмма) и величине модуля стока взвешенных наносов (R ; вариационные кривые) (Б)

1 – пункты наблюдения за стоком наносов; 2 – речная сеть; 3 – границы стока взвешенных наносов; 4 – водораздел р. Волги.

Цифрами в кружках на карте обозначены водохранилища: 1 – Чебоксарское, 2 – Куйбышевское, 3 – Саратовское, 4 – Волгоградское, 5 – Камское, 6 – Воткинское, 7 – Нижнекамское. Римскими цифрами на графике обозначены кривые распределения модуля стока взвешенных наносов по бассейнам различной сельскохозяйственной освоенности (I – слабо освоенные; II – средне освоенные; III – интенсивно освоенные)

Банк данных состоит из нескольких в значительной степени независимых друг от друга, но взаимосвязанных частей, каждая из которых может использоваться самостоятельно (рис. 3). Первая часть включает в себя общие сведения о гидрологических постах и их местоположении. В ней хранится информация о наименовании поста и реки, на которой он располагается, принадлежности речного бассейна крупным природным и политико-административным единицам. Здесь же хранятся значения географической широты и долготы поста для его точной пространственной локализации.

Во второй – наиболее обширной – части банка данных содержатся разнообразные сведения о природно-антропогенных условиях речных бассейнов. Сюда включены

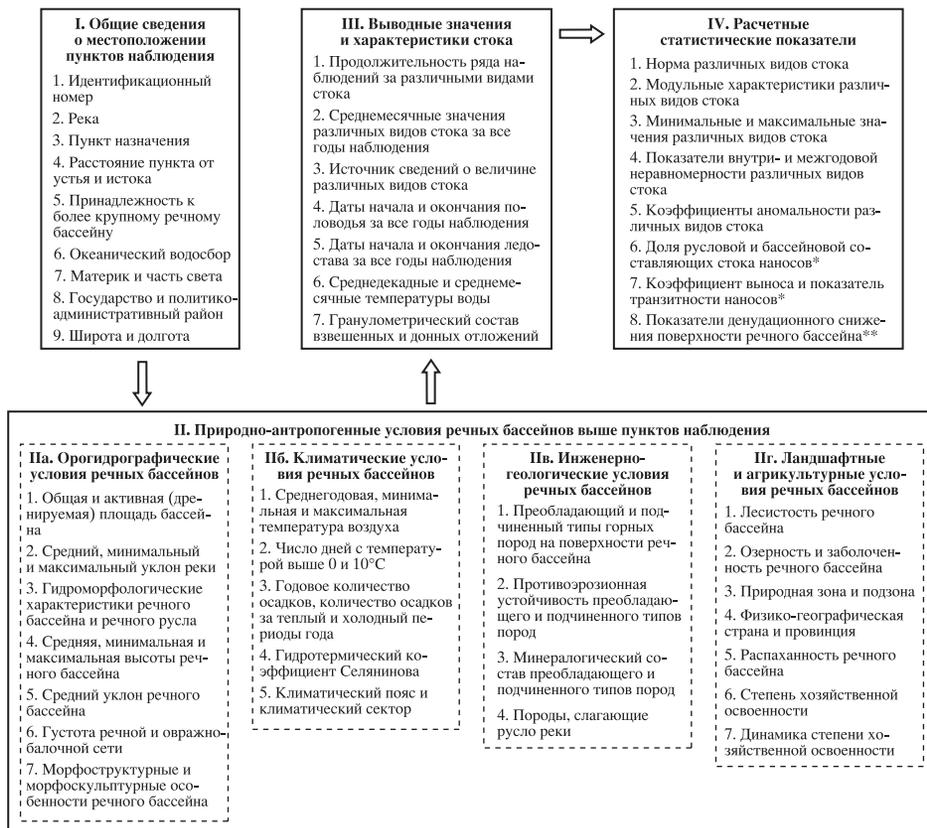


Рис. 3. Структура банка данных по стоку взвешенных наносов и контролирующим его факторам, интегрированного в глобальную геoinформационную систему

Расчитываемые показатели: * – только для стока наносов, ** – для стока наносов и стока растворенных веществ. Во всех прочих случаях показатели стока рассчитываются для всех его видов. Остальные пояснения в тексте

данные об орографии поверхности водосборов, гидрометеорологических условиях, инженерно-геологических характеристиках, ландшафтном и агрикультурном облике речных бассейнов.

В третью часть включены измеренные величины по стокам воды, наносов и растворенных веществ с дискретностью до месяца, реже – до гидрологической фазы. Наконец, в последней четвертой части банка данных приведены обобщающие статистические показатели – норма, минимум/максимум, показатели внутри- и межгодовой неравномерности стока, коэффициенты аномальности, доли русловой и бассейновой составляющих стока наносов, различные показатели денудационного снижения земной поверхности и т. п. Перечисленные характеристики рассчитываются в автоматическом режиме по общепринятым формулам по данным из предыдущих блоков. Добавление или удаление данных вследствие удлинения или корректировки ряда обновляет и весь набор статистических характеристик, которые служат основой для разработки пространственных и временных математико-статистических моделей речного стока, контролирующих его факторов, характера и интенсивности механической и химической денудации на речном водосборе.

Подходы к научно-практическому применению создаваемой глобальной геoinформационной системы “Сток взвешенных наносов в речных бассейнах Земли” можно группировать в четыре направления. Первое связано с организацией электронных баз

данных и системами их управления. Огромный массив информации (свыше 4 тысяч постов наблюдений по Земле) будет упорядочен в тематических базах (орографических, гидрологических, климатических, ландшафтных, литологических и т.д.), которые уже сами по себе представляют интерес в различных областях наук о Земле. Второе направление связано с геостатистическими исследованиями по сформированным на предыдущем этапе базам данных. В рамках этого направления может быть организован полный математико-статистический анализ величины стока наносов и транзитной денудации с учетом географического фактора. Результатом этого направления должна стать глобальная географо-статистическая модель, описываемая с максимальным приближением математическими уравнениями и позволяющая количественно оценить величину стока наносов в любой произвольной точке земного шара, роль отдельных факторов или их совокупности на сток наносов, установить тренд и дать прогноз развития его величины и т.д. В ее основу могут быть положены уже существующие эмпирические модели (например, такие, как ART, DBFM, BQART, и другие), неплохо зарекомендовавшие себя на региональном материале [8–10]. Третье направление, наиболее тесно связанное с геоинформационными технологиями, предполагает электронно-картографическую визуализацию закономерностей распределения величины стока наносов рек Земли на разных уровнях генерализации – от локального и регионального до планетарного. Четвертое направление связано с распространением полученных результатов в другие научные центры нашей страны и зарубежья. Наиболее перспективным решением представляется публикация всех полученных результатов в интернете. Авторизованные пользователи смогут получить доступ к базам и банку данных, материалам геостатистической обработки, адаптированному к сетевой среде варианту глобальной геоинформационной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев Д.А. Старые и новые пути развития геоморфологии // Геоморфология. 1981. № 4. С. 31–43.
2. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Современная геоморфология: основные направления развития // Геоморфология. 1988. № 4. С. 3–8.
3. Дедков А.П. Геоморфология на пороге нового века: пройденные этапы и современные тенденции // Геоморфология. 2001. № 1. С. 3–10.
4. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Стационарные наблюдения и полевой эксперимент // Количественный анализ экзогенного рельефообразования. Казань: Изд-во КазГУ, 1987. С. 3–11.
5. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во КазГУ, 1984. 264 с.
6. Syvitski J.P.M., Peckham S.D., Hilberman R., Mulder T. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective // Sedimentary Geology. 2003. V. 162. Iss. 1–2. P. 5–24.
7. Lindsay J.B. The terrain analysis system: a tool for hydrogeomorphic applications // Hydrol. Processes. 2005. V. 19(5). P. 1123–1130.
8. Syvitski J.P.M., Kettner A.J. On the flux of water and sediment into the Northern Adriatic Sea // Continental Shelf Res. 2007. V. 27. Iss. 3–4. P. 296–308.
9. Llique C., Canals M., Ludwig W., Arnau P. Sediment discharge of the rivers of Catalonia, NE Spain, and the influence of human impacts // Journ. of Hydrology. 2009. V. 366. Iss. 1–4. P. 76–88.
10. Мозжерин В.И., Мозжерин В.В. Мировой сток взвешенных наносов: его геоморфологическая и геоэкологическая интерпретация // Геоморфология. 2011. № 1. С. 13–24.

Казанский (Приволжский)
федеральный университет

Поступила в редакцию
22.04.2011

GLOBAL GEOINFORMATION SYSTEM “SUSPENDED SEDIMENT YIELD IN THE RIVER BASINS OF THE EARTH”

O.P. YERMOLAEV, K.A. MALTSEV, V.V. MOZZHERIN, V.I. MOZZHERIN

S u m m a r y

General-theoretical and methodical problems of creation and use of the global geoinformation system, which reflects the basic regularity of formation, spatial and temporal variability of suspended sediment yield of the Earth's rivers, are considered. The role of river basins as geosystem formation in research of sediment yield is shown. Approaches to the automation detection of river basins boundaries, methods of integration geoinformation system with thematic databases for purpose of geomorphological analysis of river suspended sediment yield are offered and tested.