

МЕЛИОРАЦИЯ

УДК 631.6

ВОДОСБОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАК ФРАКТАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ

Н.К. Вахонин, кандидат технических наук
РУП «Институт мелиорации»

Ключевые слова: фрактал, водосборная поверхность, рельеф, моделирование

Введение

Формирование поверхностного стока и связанная с этим продолжительность затопления участков поверхности земли определяется естественно выделяющимися типами форм рельефа, формирующими ландшафт рассматриваемой территории. Характерные формы: холм (возвышение), западина (понижение), особенностью которых является двухмерное стекание; и вытянутые элементы: хребет (возвышение), лощина, тальвег (понижение), по которым происходит одномерное стекание, а также плоскогорье и равнина – безуклонное возвышение и понижение соответственно.

Выделение любой из этих форм рельефа получается на основе съемки отметок поверхности земли в нерегулярном наборе точек. По ним строится цифровая модель поверхности рельефа с использованием различных алгоритмов интерполяции, на основе которой могут быть получены различные характеристики, определяющие формирование поверхностного стока.

Пониженные элементы рельефа, куда стекает вода, делятся на бессточные и опорожняемые (проточные). В случае, если западина канализирована естественной складкой рельефа или искусственно устроенным руслом (канал, борозда), прорезанной до дна ее чаши, она является полностью опорожняемой. В противном случае бессточная емкость западины (котловины, лужи) определяется возвышением наиболее низкой отметки ее бровки над отметками дна, после превышения которой поверхностный сток с выше-расположенной водосборной площади рассматриваемой западины транзитом течет в нижерасположенную складку рельефа.

При этом как сточные, так и бессточные понижения делятся на постоянно и периодически заполняемые водой, что определяется как параметрами их рельефа (морфометрическими характеристиками) – прежде всего, размерами поперечного сечения фронта стекания на входе и выходе потока, величиной водосборной площади и временем добегания, определяющими сток и наполняемость, – так и величиной других приходных и расходных элементов водного баланса: осадки, испарение, инфильтрация. Постоянно заполненными бессточными понижениями различного уровня крупности являют-

ся моря, озера, а периодически заполненными – западины, лужи, блюдца и т.п. Постоянно заполненными проточными – реки, каналы, периодически – ручьи, ложбины, борозды.

Любой тип понижения – западина, тальвег, низменность – в свою очередь состоит из вышеперечисленных типов элементов рельефа, но более мелкого уровня крупности, каждый из которых включает те же элементы еще более мелкого масштаба и так далее, повторяясь до уровня вложенности с исчезающе малыми характерными размерами (лужи, углубления между почвенными комьями – углубления между отдельными песчинками и т.п.). Аналогична ситуация и с возвышенными элементами рельефа, имеющих понижения, внутри которых, в свою очередь, находятся возвышения более мелкого масштаба. Т.е., каждый тип рельефа сам представляет собой поверхность, складывающуюся из все тех же вышеперечисленных типов элементов рельефа: западин, холмов, тальвегов, хребтов все более мелкого вложенного уровня крупности (макро, мезо, мини, микро, нано и т.д.).

Таким образом, реальная поверхность земли представляется нерегулярными самоподобными формами, бесконечно повторяющимися на все более мелком уровне вложенности, для определения которых в 70-е годы прошлого столетия Бенуа Мандельбротом, основываясь на работах Кантора, Пуанкаре, Хаусдорфа, было введено понятие фрактала (от латинского fractus – раздробленный, расколотый, состоящий из фрагментов) [1]. В отличие от Евклидовой геометрии, схематизированно описывающей каждый элемент и рельеф участка земной поверхности в целом двумерной поверхностью в трехмерном пространстве $z=f(x,y)$, в фрактальной геометрии реальная поверхность земли, представляющая собой совокупность все более мелких элементов рельефа, подобных целому (в действительности не описываемых классическими двумерными кривыми или их сочетанием) имеет дробную размерность между 2 и 3.

Скопление воды происходит в различного уровня вложенности бессточных западинах на фрактальной поверхности. При этом глубина наполнения западины, остающаяся после прекращения поверхностного стока (бессточный объем), определяется наиболее высокой отметкой дна, раскрывающей их, наиболее заглубленной естественной или искусственной трассы стока (тальвега, ложины, воронки, борозды и т.п.), а соответствующая величина бессточного объема западины определяется морфометрической характеристикой дна нижней остающейся затопленной ее части.

И для бессточных водоемов, и для проточных рек (каналов) поверхность бассейна включает три составляющих: а) площадь, с которой формируется собственная распределенная боковая поверхностная приточность по всей длине водотока (периметру водоема); б) площадь, участвующая в формировании сосредоточенной точечной приточности впадающих в него водотоков, т.е. водосборная площадь притоков всех более высоких порядков; в) площадь замкнутых бессточных понижений различного иерархического уровня крупности. В результате общая водосборная площадь состоит из водосбора не-

посредственно данного водотока (водоема) и водосбора площадей его притоков за вычетом всех бессточных понижений. В конечном итоге складывается водосборная площадь бассейна гидрографических объектов любого иерархического уровня вложенности: от осушителя до наиболее крупных замкнутых котловин – моря (озера), рек-водоприемников, представляя собой фрактальную поверхность с бесконечным числом «дыр» (бессточных понижений) различного характерного уровня крупности.

В связи с этим сложно находить действительную водосборную площадь, так как из общей площади, например, глобального бассейна моря, необходимо вычесть не только площади макроразливания на этой территории (водосборные площади озер), но и площади всех более мелких бессточных мезо, мини, микро западин, причем они могут быть расположены и на в целом имеющих пути стекания склонах (рис. 1).

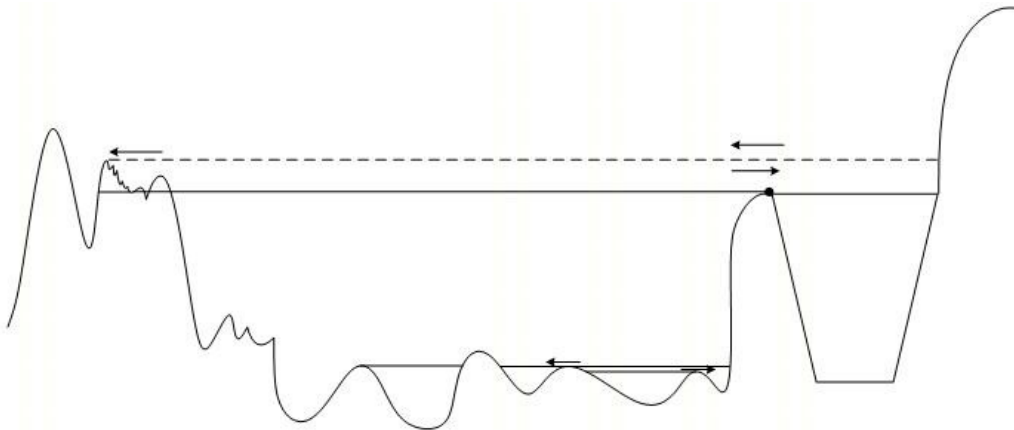


Рисунок 1 – Бесконечный уровень вложенности самоподобных элементов рельефа поверхности водосбора водотока

При этом в связи с фрактальностью поверхности земли, водосборная площадь любого водотока (водоема) при рассмотрении рельефа со всё большей детальностью его изломов складывается в проявлении двух противоречивых тенденций:

– бесконечного увеличения площади поверхности земли (что, однако, не меняет объем поступления осадков на водосбор, так как они выпадают перпендикулярно проекции рельефа на плоскость, т.е. на постоянную площадь, тогда как более подробно прослеживаемые (измеряемые) при этом линии тока имеют все большую длину);

– увеличения бессточной площади, исключаемой из водосборной, в результате учета бессточных понижений все более мелкого уровня крупности (число которых увеличивается по мере уменьшения их характерного размера), имеющих место не только на

пониженных элементах рельефа, но и на холмах, минивозвышениях, на которых при формирующемся стекании образуются свои бессточные лужи, в которых в свою очередь свои более мелкие незатопленные пики, на которых свои еще меньшие бессточные блюдца и т.д. (рис. 1).

Однако при этом необходимо учитывать, что все понижения любого уровня вложенности остаются бессточными не постоянно, а только до момента переполнения их развивающимся поверхностным стоком до «краев» – водораздельного гребня в наиболее низком месте, после чего имеет место перетекание из одного водосборного бассейна на различного иерархического уровня вложенности в другой.

Поэтому площадь остающихся бессточными участков уменьшается по мере увеличения интенсивности (объема) выпадающих осадков и заполнения в результате этого поверхностным стоком все более крупных западин (т.е. перехода все более крупных выступов рельефа «в разряд шероховатости»), вследствие чего они становятся проточными. При этом, в зависимости от интенсивности переполнения соседних западин, переток из одного водосбора в другой может происходить в диаметрально противоположных направлениях, как показано на профиле рис.1.

В связи с фрактальностью поверхности земли площадь водосборной поверхности – как замкнутой западины, так и водотока – не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от глубины стекающей поверхностной воды: увеличивается по мере заполнения все более крупных замкнутых складок и перетока через наиболее пониженные отметки их гребня в соседние микро-, мини-, мезо- и т.д. водосборы от нуля до в пределе (после полного затопления данного участка стекающей поверхностной водой) всей площади проекции участка на горизонтальную плоскость, по нормали к которой и выпадают осадки.

При этом количество выделяемых уровней вложенности субводосборов не является predetermined числом (как, например три уровня в [2]), а зависит от перепадов отметок поверхности объекта и детальности съемки рельефа: густоты точек определения отметок и разрешающей способности (цены деления) прибора по их измерению, а также точности его позиционирования на точке измерения, определяющих возможную детальность восстановления (прорисовки) форм рельефа. Это относится к любому типу рельефа – и холмистому, и равнинному.

Выделение (оконтуривание) бессточных западин может быть осуществлено двумя отличающимися способами [3]:

- посредством интерполяции отметок поверхности земли, найденных различными способами (фотограмметрия, топосъемка в нерегулярной или регулярной сети точек);
- непосредственным оконтуриванием границы затопления (очевидно, соответствующей конкретной глубине затопления) на местности по космоснимкам, GPS позиционированием, привязкой в натуре к «естественным осям координат» – каналам, дорогам и т.п.

Подробность съемки рельефа при изысканиях, затраты на которую резко возрастают с ростом детальности, должна выбираться не из понятия «масштаб создаваемого плана», а из прагматических соображений – установления размеров понижений, выявления их канализованности (самоопорожняемости) и т.п. с точностью, необходимой для обоснованного выбора при проектировании экономически эффективных мелиоративных решений, чем и определяется требуемое число уровней вложенности подлежащих выделению водосборов.

В соответствии с вышеизложенным, поверхностный сток от выпадающего дождя представляет собой процесс движения воды по фрактальной поверхности, начинающийся со стекания микроструй предельно малого поперечного сечения по самым наименьшим, предельно изломанным микротрещинам поверхности склона, складывающихся из исчезающе малых микрозападин, после переполнения которых начинается перетекание в соседние микроводосборы, и с увеличением глубины происходит объединение «микрорусел» во все более широкие и все менее изогнутые стекающие струи, охватывающие элементы рельефа все более крупного уровня вложенности и в пределах достигающее поверхностного стекания со сплошным слоем воды. Последнее в действительности случается чрезвычайно редко – при экстремально интенсивных ливнях.

В связи с фрактальным характером рельефа, исходной характеристикой которого являются отметки поверхности земли, фрактальный характер имеет и производная от них характеристика – уклоны поверхности земли. При равномерном, установившемся течении уклоны поверхности земли определяют направление поверхностного стока (в сторону антиградиента) и величину его расхода в соответствии с формулой Шези $Q = WC\sqrt{Ri}$. Однако такая предельная схематизация не соответствует реальному течению по фрактальной поверхности, которое и при струйном перетекании между микроводосборами, и при редко формируемом стекании сплошным слоем не копирует поверхность рельефа и происходит не только в направлении, но и против уклона ее поверхности (рис.1). В результате фрактального характера поверхности водосбора поверхностный сток имеет неравномерный, неустановившийся характер, в связи с чем обычно используемое при его моделировании уравнение кинематической волны не соответствует действительным условиям, так как предполагает соответствие уклона стекающей воды уклону земли.

Следует также отметить, что в каждой точке водосбора имеет место быть не одно направление линии тока, а целый ряд возможных траекторий стекания выпадающих осадков, конкретный вариант которой реализуется в соответствии со сложившейся в текущий момент глубиной наполнения микро-, мини-, мезо-, макро- западин (затопления нано-, микро-, мини- и т.п. выступов, т.е. уровня крупности гребней шероховатости), и соответственно формирующимся перетеканием между ними, определяющим действительное направление течения в каждой точке (рис.1).

Соответственно, время добегания от любой точки водосбора (водораздела) до замыкающего створа также не является константой, т.к. определяется сложившимся в данный момент направлением и протяженностью линии стекания, зависящих от текущей глубины затопления. Оно изменяется от бесконечности (отсутствие добегания) – при изначально бывших пересохшими бессточных мини, микро и т.п. понижениях, на заполнение которых расходуется поверхностный сток – до все меньших значений, соответствующих переполнению все более крупных понижений и, соответственно, все менее искривленным и в результате менее протяженным траекториям стекания.

Так как водосборная площадь представляет собой фрактальную поверхность, то проекции ее сечений на горизонтальную плоскость являются фрактальными линиями. В результате этого со все большим сгущением топографической съемки (отражением все более мелких деталей рельефа), картина горизонталей для одного и того же участка земли меняется качественно: помимо бесконечного увеличения их извилистости, появляется также все большее число замкнутых горизонталей (понижений) с одной и той же отметкой (рис.2).

Частный пример проявления фрактальности горизонталей – так называемый парадокс Ричардса: явление бесконечного увеличения длины береговой границы Англии (являющейся линией пересечения возвышенности острова горизонтальной плоскостью поверхности воды океана, т.е. горизонталью по определению, причем визуально наблюдаемой на местности) при бесконечном увеличении точности измеряющего устройства.

Представление рельефа в виде горизонталей (линий сечения поверхности земли горизонтальными плоскостями с заданным шагом), получаемых посредством формальной интерполяции (например, одним из реализованных в ГИС алгоритмов), отметок поверхности, определяемых в дискретной сети точек при топосъемке, является привычной (удобно обозреваемой) формой отображения рельефа. Однако такая форма представления рельефа неэффективна для автоматизированного проектирования, для которого необходимо представление его в виде цифровой модели – матрицы рельефа отметок поверхности в регулярной сети точек [3].

С увеличением точности топосъемки (увеличением густоты точек измерения отметок и точности прибора для измерения) бесконечно возрастает количество выделяемых западин все более мелкого (макро-, мезо-, мини-, микро-) уровня крупности. Однако при этом невозможно сделать достоверный вывод о бессточности (или опорожняемости) каждой из них, т.к. в действительности понижение может быть как вскрыто предельно узкой прорезью, так и наоборот – отгорожено узким хребтом, характерный поперечный размер которых находится на подсеточном уровне по отношению к густоте проводившейся съемки рельефа, в результате чего их отметки не были зафиксированы и соответственно не учитывались при интерполяции. Восстановление рельефа между исходными точками съемки, т.е. выделение форм рельефа на подсеточном уровне, посредством

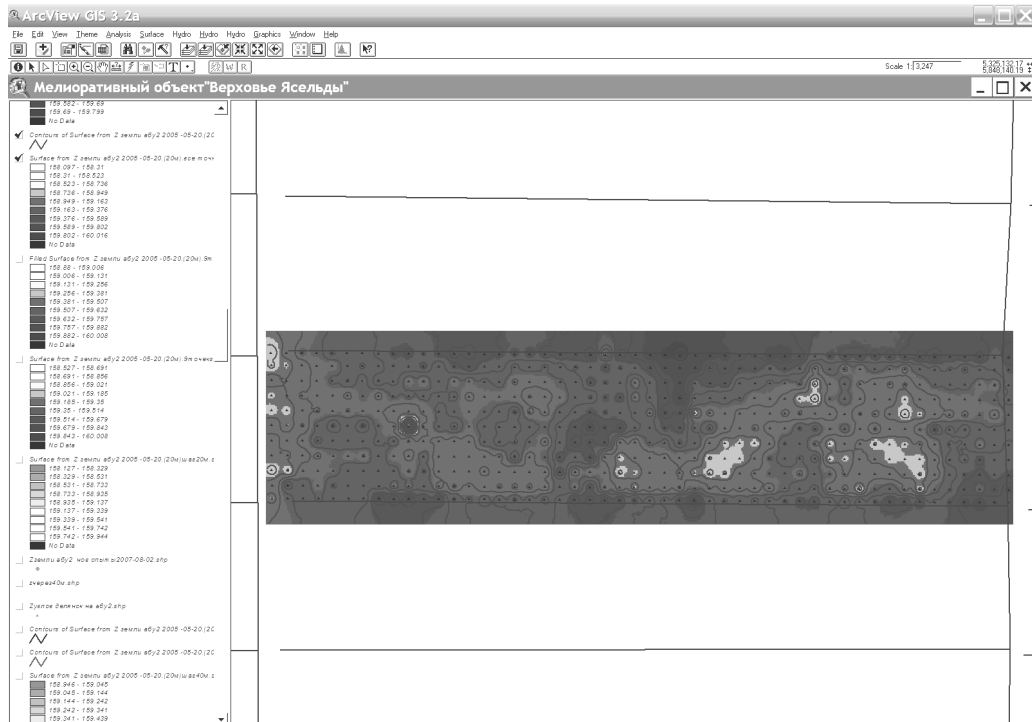
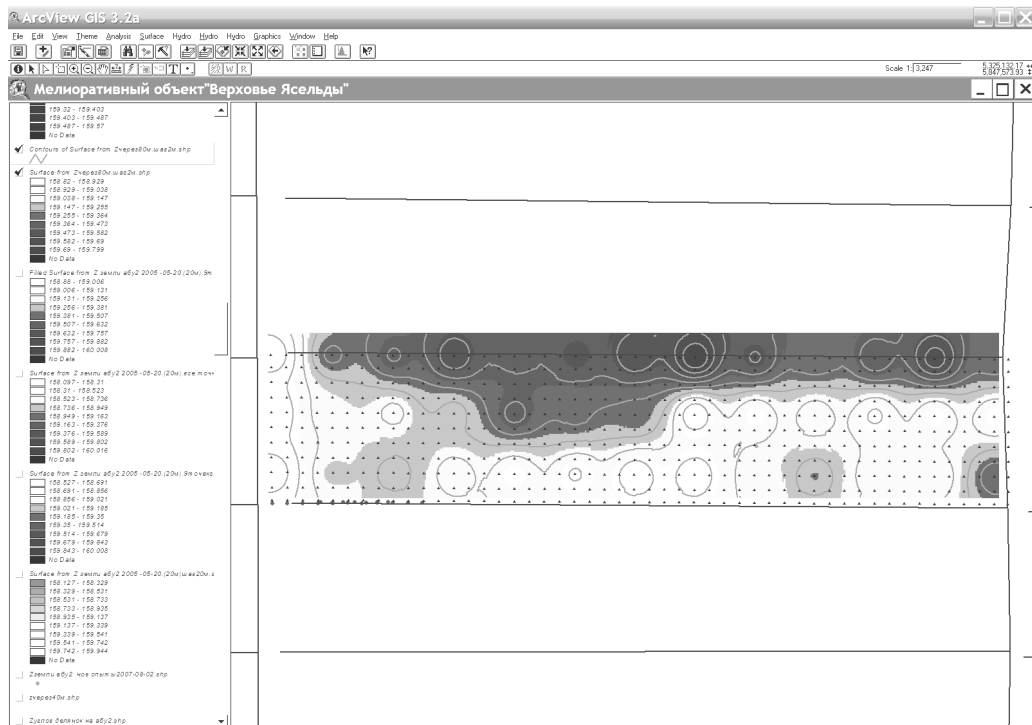


Рисунок 2 – Поверхность рельефа между каналами-осушителями на мелиоративном объекте «Верховье Ясельды», построенная по результатам нивелировки по квадратам с шагом 80 м и 20 м

построения матрицы рельефа в узлах регулярной сетки с мелким шагом или посредством построения горизонталей, представляет собой формальную интерполяцию отметок, зафиксированных в точках топосъемки, в частности, с использованием реализованных в ГИС различных алгоритмов (IDW, Splain, Criging и т.п.). В связи со случайным характером изменения отметок рельефа, совпадение интерполированных значений с реальными имеет вероятностный характер, и установление их соответствия возможно только при проведении дополнительной съемки с более густым шагом.

Очевидно, что реально возможные интенсивности и продолжительности осадков, а также возможные величины инфильтрации определяют возможные величины поверхностного стока и соответственно возможность переполнения западин определенного уровня крупности. При этом для проектирования следует определить градации размеров (глубин, площадей, а соответственно объемов), в соответствии с которыми размеры западин кластеризуются на мега (макро-, мезо- и т.д.) и при изысканиях выбирать компромиссный вариант между желаемой точностью освещения рельефа для лучшей информационной обоснованности выбора местоположения мелиоративной сети и ростом стоимости топографической съемки при ее детализации.

Для организации стока из замкнутых понижений, максимальная глубина воды в которых, определяющая площадь затопления, равна высоте бровки над дном, необходимо их прорезание искусственным мелиоративным водотоком (канал, канава, ложбина, борозда, воронка и т.д.) для обеспечения возможности полного их опорожнения заглубленным ниже отметки их дна. Очевидно, что любым таким водотоком можно вскрыть только часть выявленных при топосъемке бессточных понижений некоторого уровня крупности (и не выявленных тоже). Все остальные замкнутые западины на осушаемом водосборе, в особенности более мелкого уровня крупности, останутся невскрытыми. Поэтому проектирование сети для отвода поверхностных вод представляет компромисс между протяженностью и изломанностью выбираемой сети (и, в конечном итоге, затрат на проведение работ) и числом и размерами (площадью) раскрываемых ею замкнутых понижений, определяющих увеличение доходов от прироста урожайности.

При этом необходимо также принимать во внимание и то, что прорезание бровок западин (например, приканальной бровки на рис.1), помимо положительного действия при осушении – сброса воды из раскрывшихся при этом понижений, может иметь и негативный эффект – возможность более обширных затоплений в половодья и паводки всех ранее защищенных бровкой площадей, русловым стоком канала, поступающим в результате сбросов с выше расположенных или подпором от ниже расположенных водотоков.

Выводы

1) Локальные понижения, которые можно разделить на опорожняемые и бессточные, могут находиться на любых формах рельефа (равнинах, холмах, плато), иметь различный уровень вложенности и различный характерный размер (макро-, мезо-, микро-, и т.п.).

2) Неопорожняемое понижение имеет свой водосбор, являющийся бессточным до момента заполнения водой его емкости до отметки наиболее низкого участка бровки,

после чего вся его водосборная площадь становится поверхностью формирования транзитного стока в соседнее более низкое понижение, т.е. становится частью его водосборной площади.

3) Процесс поверхностного стока развивается в виде струйного стекания по фрактальной земной поверхности, начиная с русел предельно мелкого размера с ростом водосборной площади по мере заполнения бессточных западин все более крупного характерного размера. При этом течение воды происходит в виде неравномерного, неустановившегося движения, что не учитывается в обычно используемых при моделировании поверхностного стока уравнениях кинематической волны.

4) Для осуществления автоматизированного проектирования не эффективно использование данных о рельефе в форме горизонталей. Поэтому их целесообразно представлять в виде цифровой модели местности – матрицы рельефа.

5) С увеличением детальности топосъемки возрастает подробность освещения рельефа, в том числе выделение все более мелких понижений, включая бессточные, определения их водосборных площадей, но при этом прогрессивно растут затраты на ее осуществление. Поэтому выбор точности съемки должен осуществляться из прагматических соображений: уровня детальности требуемого для обоснованного проектирования экономически эффективной мелиоративной сети. Вариант планового расположения (общей протяженности) открытой сети, определяющий количество и площадь раскрываемых бессточных понижений различного уровня крупности, также должен выбираться по экономическим критериям: максимальной окупаемости за счет прироста урожая при минимуме затрат на ее прокладку.

Литература

1. Mandelbrot, B. The fractal geometry of nature. NY. – 1982
2. Макоед, В.М., Хмелевская, Г.В., Куканова, О.Н. Влияние рельефа мелиоративных объектов на формирование поверхностного стока в условиях Белорусского Поозерья // Мелиорация. – №1(67). – С. 50–60.
3. Вахонин, Н.К. Принципы организации пространственно распределенных данных мелиоративных сельскохозяйственных объектов в системе информационного обеспечения принятия решений ГИС «МСХО» // Мелиорация. – №2(64). – С. 5–18.

Summary

Vakhonin N.

COLLECTION OF WATER FROM THE SURFACE OF A FRACTAL OBJECT

The paper analyzes the characteristics of watersheds from the standpoint of fractal geometry. Questions of the formation of surface runoff and its simulation on the surface fractal considered. Detailed coverage of the relief for the sound design of drainage network analyzed.

Поступила 01 октября 2012 г.