

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование. – Л.: Гидрометеоздат, 1960. – 288 с.
- Быков В.Д. Сток рек Урала. – М.: МГУ, 1963. – 143 с.
- Шкляев А.С. Опыт районирования территории Среднего и Южного Урала по преобладающему влиянию форм атмосферной циркуляции на сток / Сб. работ Свердловской гидрометеорологической обсерватории. – Свердловск, 1965. – Вып. 4. – С. 40–53.
- Орлова К.Е. Влияние атмосферной циркуляции на формирование годового стока в лесной, лесостепной и степной зонах Зауралья: автореф. дис. ... к. геогр. н. – Пермь, 1968. – 22 с.
- Силаева Л.Ф. Районирование Урала по показателю внутригодовой неравномерности стока // Вестник МГУ. Серия географическая. – 1974. – № 5. – С. 97–99.
- Андреева М.А. Гидрологический режим рек Челябинской области / Гидрометеорологический режим Южного Урала. – Челябинск: ЧГПИ, 1983. – С. 3–16.
- Рассказова Н.С. Многолетние колебания стока р. Тобол: автореф. дис. ... к. геогр. н. – Пермь, 1992. – 15 с.
- Рассказова Н.С. Многолетние колебания стока рек и их связь с космо- и геофизическими факторами (на примере рек бассейнов Камы и Тобола). – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – 233 с.
- СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству // Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
- Андреянов В.Г. Внутригодовое распределение речного стока. – Л.: Гидрометеоздат, 1960. – 319 с.
- Статистика / под ред. проф. М.Р. Ефимовой. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 160 с.
- Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ. № 2000610197 от 21.03.2000 г. / Н.С. Рассказова. Российское агентство по патентам и товарным знакам. – М.: Роспатент, 2000.
- Румянцев В.А., Трапезников Ю.А., Хорбаладзе М.А. Межгодовая изменчивость уровней воды озер // Известия АН. Серия географическая. – 2000. – № 1. – С. 64–68.
- Дорофеюк А.А., Лумельский В.Я. Алгоритмы обучения распознавания образов: Оценка полученных классификаций. Выбор критерия классификации. – М.: Советское радио, 1973. – 196 с.
- Олдендерфер М.С., Блэншфилд Р.К. Методы проверки обоснованности решений / Факторный и дискриминантный и кластерный анализ / под ред. Дж.О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др. – М.: Финансы и статистика, 1989. – С. 192–202.
- Бубин М.Н. Многолетние колебания сезонного стока рек Челябинской области: автореф. дис. ... к. геогр. н. – Пермь, 2007. – 24 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Средний Урал и Приуралье (Тобол) / под ред. Н.М. Алюшинской. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – Вып. 2. – 288 с.

Поступила 14.12.2009 г.

УДК 556;551.4

РЕЧНОЙ СТОК И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОСБОРОВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

А.Н. Никитенков, Е.М. Дутова

Томский политехнический университет

E-mail: corestone@mail.ru

С использованием методов геоинформационных технологий получены морфометрические параметры водосборов рек северной части Кузнецкого Алатау. По данным многолетних гидрометрических наблюдений определены величины речного стока и его составляющих, особенности их внутригодовой изменчивости. Средствами корреляционного анализа оценена взаимосвязь морфометрических параметров водосборов и величин модулей стока.

Ключевые слова:

Поверхностный сток, подземный сток, гидрограф, морфометрические параметры водосборов, геоинформационные технологии, корреляционный анализ.

Key words:

Surface flow, underground flow, hydrograph, morphometric characteristics of river basins, geographic informational systems, correlation analysis.

В настоящее время характеристики стока широко используются при решении множества теоретических и прикладных задач, связанных с водно-экологическими проблемами и эксплуатацией недр [1–4]. Вопросам формирования стока, разработке методов его количественной оценки посвящены фундаментальные работы Б.И. Куделина, Ф.А. Макаренко, М.И. Львовича, Ф.П. Саварен-

ского, О.В. Попова, В.А. Всеволожского, И.С. Зекцера и других исследователей. Существующие методы оценки стока базируются на анализе гидрометрических данных, получение которых в природных условиях требует проведения трудоемких, дорогостоящих полевых работ и организации стационарных постов, что реально возможно только для крупных водосборных бассейнов. В этой связи для

территорий, характеризующихся слабой гидрогеологической изученностью, особенно для горно-складчатых областей, весьма актуальными становятся приемы оценки взаимосвязи характеристик стока и определяющих их факторов, в частности, морфометрических параметров водосборов. Среди параметров могут быть высотные характеристики, определяющие количество атмосферных осадков, уклоны поверхности, определяющие скорости движения вод и проч. Установленные на основе данных единичных створов стационарных гидрометрических постов с помощью средств современных ГИС-технологий взаимосвязи могут использоваться для определения характеристик стока на аналогичных, но слабо изученных территориях. В качестве объекта исследований таких территорий нами выбрана северная часть Кузнецкого Алатау, ранее в пределах которой работы по изучению подземного стока затрагивали лишь некоторые локальные объекты или в весьма схематичном виде выполнялись при региональных оценках ресурсов. Результаты этих исследований нашли свое отражение в отчетах, статьях, монографиях и диссертациях сотрудников производственных и научных организаций Е.М. Дутовой, В.П. Карловой, В.С. Кусковско-го, В.М. Людвиг, А.И. Петрова, Д.С. Покровско-го, О.В. Постниковой, Н.М. Рассказова, Ж.Н. Савиной, О.Г. Савичева и многих других. В данной работе впервые проводится комплексная оценка стока рек и его взаимосвязи с морфометрическими параметрами их водосборных бассейнов. Работа выполнена на основе многолетних данных и с использованием современных средств ГИС.

Северная часть Кузнецкого Алатау, представляет собой систему асимметричных средневысотных горных хребтов, характеризующуюся резко континентальным климатом. При отрицательных среднегодовых температурах среднемесячные температуры составляют для января $-(15...22)^\circ\text{C}$, июля $16,5...16,9^\circ\text{C}$. Среднегодовое количество осадков колеблется в широких пределах, в большинстве своем, составляя величины $800...1400\text{ мм/г}$ и увеличиваясь до 1800 мм/г в отдельных местах. Из них порядка $30...40\%$ удаляется в виде испарения и транспирации, оставшиеся $70...60\%$ идут на формирование речного стока.

Реки северной части Кузнецкого Алатау входят в систему р. Оби и принадлежат бассейнам р. Томи и Чулыма. Густота речной сети составляет $0,46...0,60\text{ км/км}^2$. Рассматриваемые реки Верхняя Терсь и Тайдон формируют сток западных склонов Кузнецкого Алатау, р. Кия, Яя, Золотой Китат, Кожух, Урюп, Дудет, Черный и Белый Июсы – сток северных и северо-восточных склонов. Все они в верховьях и среднем течении представляют собой типично горные реки, имеют глубоко врезаемые долины, порожистые русла, большие скорости течения, характеризуются интенсивным весенним половодьем с сильным поднятием уровней воды. В период летней межени средние скорости течения

составляют $0,2...0,6$ и $0,8...3\text{ м/с}$ – в паводок. Максимальные скорости течения, наблюдавшиеся в паводок на реках, составляют $3,1...3,6\text{ м/с}$. Питание рек преимущественно смешанного типа [5,6].

Основными морфометрическими факторами, определяющими гидрологические особенности территории, являются геоморфологическое строение и гипсометрическое положение речных водосборов. Наиболее характерной является зависимость величины общего и поверхностного стока от гипсометрических отметок водосбора. В гидрогеологическом отношении роль рек в пределах исследуемой территории сводится преимущественно к дренированию подземных вод разнообразных магматических, осадочных и метаморфических пород разных возрастов.

Для определения составляющих стока использовались данные по среднемесячным расходам рек в 10 гидрометрических пунктах с многолетним периодом наблюдений (1930–2000 гг.) сети Росгидромета. Схема расположения гидрометрических пунктов представлена на рис. 1. Восполнение недостающих по продолжительности рядов наблюдений выполнялось на основе рекомендаций, изложенных в нормативных документах [7].

Картографические построения порядков речных долин и водосборов рек, определение их морфометрических параметров (периметр, площадь, длина основного водотока, минимальные, максимальные и среднеплощадные высоты, уклоны) осуществлялись средствами ArcGIS 9.2 на цифровой топографической основе, созданной с использованием данных космического зондирования Земли [8].

Расчленение гидрографов проводилось на основе подходов, разработанных Б.И. Куделиным [9]. Для условий горных территорий регулирующее влияние поймы отсутствует, а глубинная составляющая подземного стока, по своим величинам соответствующая стоку реки в период независимого режима (январь-март), остается практически постоянной в течение всего гидрологического года.

Вскоре после прохождения пика расходов в период весеннего половодья, в период спада, когда уровень воды в реке быстро снижается, к глубинной составляющей подземных вод добавляется расход, поступающий за счет инфильтрационной подпитки водами, образующимися при таянии снега и дождевых осадках. Долю подземного стока, формирующегося за счет инфильтрационной составляющей в период времени года со стабильными положительными температурами мы выделяем как грунтовую составляющую подземного стока.

Практическая реализация методики расчленения гидрографов осуществлена с использованием программы, написанной на языке Visual Basic for Applications, и вычислительного шаблона в среде MS Excel, позволяющего осуществлять полуавтоматизированное вычисление основных характеристик стока.

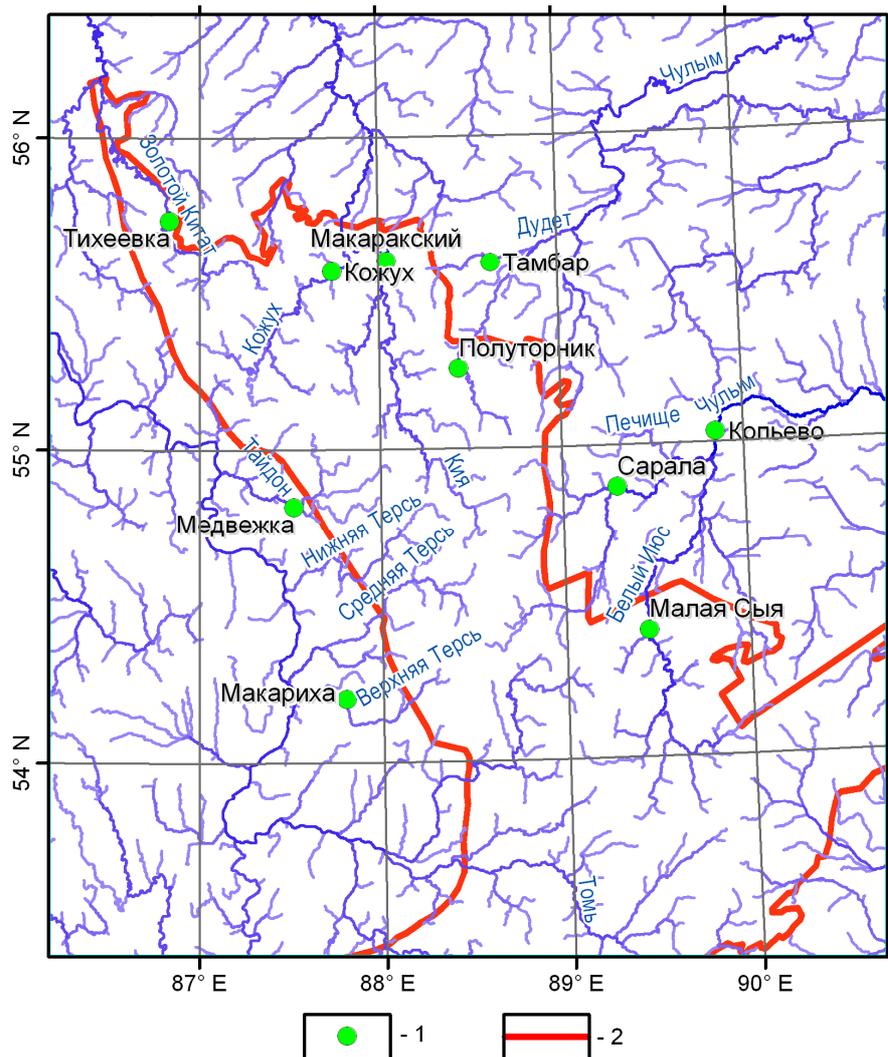


Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов: 1) гидрологический пост; 2) границы Кузнецкого Алатау

Результатом проведенной работы является база данных, содержащая детальную информацию по морфометрическим параметрам более 1500 водосборов и водотоков. В обобщенном виде данные для водосборов, обеспеченных натурным фактографическим материалом, представлены в табл. 1 и 2.

Как видно из представленных данных, величины площадей рассматриваемых водосборов при среднем значении 2080 км² разнятся более чем в 20 раз: от 480 км² для р. Урюп, представляющей собой типичную горную реку, до 9887 км² для р. Чулым, в нижнем течении приобретающей черты равнинной реки. Средние высоты водосборов составляют от 338 до 973 м абс. при амплитудах колебаний отметок рельефа в пределах отдельных водосборов от 373 до 1831 м. Уклоны речных русел различаются от 0,0016 до 0,0110. Наибольшие уклоны речных долин приходится на водосборы бассейна р. Томи, что объясняется характером сочленения западного склона Кузнецкого Алатау с Кузнецкой впадиной.

На реки западного и северо-западного склонов Кузнецкого Алатау приходятся и наибольшие модули стока со значениями 25...38 л/(с·км²). На восточных склонах они составляют 8...17 л/(с·км²). В то же время, доля подземного стока в общем стоке для водосборов западных рек составляет в среднем 17 %, а на восточных склонах при меньших абсолютных значениях модулей стока доля подземного стока составляет в среднем до 22 %. Значительное влияние на соотношение составляющих стока оказывают высотные условия водосборов, с ростом гипсометрических отметок водосборов увеличивается доля подземного стока. Усредненное соотношение генетических составляющих речного стока показано на рис. 2.

Как видно из приведенного графика, количественное распределение различных генетических составляющих в течение года колеблется очень сильно: поверхностная составляющая, формирующаяся за счет таяния снега и инфильтрации атмосферных осадков, доминирует в течение теплого

Таблица 1. Морфометрические параметры водосборов

Река, местоположение створа	Площадь, км ²	Периметр, км	Длина основного потока, км	Отметки рельефа, абс. м			Превышение, м	Уклон, м/м
				Минимальные	Максимальные	Средние		
Система р. Томь								
Тайдон, пос. Медвежка	1234	181	64,3	180	1438	504	1258	0,0110
Верхняя Терсь, пос. Осинное плесо	986	190	99,1	174	1794	578	1620	0,0103
Среднее	1110	185,5	81,7	177	1616	541	1439	0,0107
Система р. Чулым								
Золотой Китат, д. Тихеевка	1314	187	90,2	193	566	338	373	0,0023
Кия, пгт. Макарацкий	3317	348	172,5	203	1448	659	1245	0,0051
Дудет, с.Тамбар	487	108	52,9	297	893	460	596	0,0079
Урюп, пос. Полуторник	480	122	56,5	405	1228	772	823	0,0101
Белый Июс, пос. Малая Сья	3587	284	121,1	475	2205	973	1730	0,0031
Черный Июс, пос. Сарала	3157	255	127	458	1664	848	1206	0,0064
Чулым, пгт. Копьево	9887	604	227	374	2205	802	1831	0,0022
Кожух, плотбище Кожух	1780	253	117,2	202	942	433	740	0,0016
Среднее	2721	250	113,1	339	1347	660	1008	0,0050
Обобщенные данные по водосборам								
Максимум	9887	604	227	475	2205	973	1831	0,0110
Минимум	480	92	52,9	174	566	338	373	0,0016
Среднее	2352	235	107,4	304	1391	630	1087	0,0060

Таблица 2. Характеристики стока рек северной части Кузнецкого Алатау (в числителе – объём, км³; в знаменателе – модуль стока, л/(с·км²))

Система р. Томь		Система р. Чулым							
Тайдон	Верхняя Терсь	Кожух	Кия	Дудет	Урюп	Чёрный Июс	Белый Июс	Чулым	Золотой Китат
Речной сток									
1,4/35	1,2/37	1,1/25	2,6/27	0,1/5,6	0,3/20	1,4/15	1,3/12	2,8/8,5	0,62/16
Поверхностный сток									
1,2/29	1/31	0,92/22	2,1/21	0,1/4,8	0,2/15	1,2/12	1,1/9,3	2,3/7,2	0,55/14
Подземный сток									
0,25/6,1	0,19/5,9	0,16/3,7	0,59/5,5	0,02/0,77	0,01/4,5	0,26/2,6	0,31/2,8	0,4/1,3	0,07/1,8
Глубинная составляющая подземного стока									
0,19/4,7	0,09/2,7	0,11/2,6	0,38/3,6	0,01/0,31	0,06/3,5	0,16/1,6	0,19/1,7	0,28/0,88	0,04/1

времени года, достигая максимума в период весеннего половодья, приходящегося на месяцы апрель и май, и затем снижаясь вплоть до нуля ко времени установления зимней межени (ноябрь-декабрь) и полностью отсутствующая вплоть до времени начала интенсивного снеготаяния. Подземный сток ведет себя в противофазе к поверхностному. В подземном стоке, в свою очередь, мы выделяем глубинную составляющую, большую часть года достигающую 50 % от подземного стока и доводящую свою долю до 100 % в последние 2–3 месяца зимней межени. Доля глубинной составляющей определяется глубиной эрозионного вреза русел рек и гидрогеологическими условиями водосбора. Питание рек за счет атмосферных осадков и таяния снежников в период всего теплого времени года, с максимумом, приходящимся на июнь месяц, составляет значительную долю в поверхностном стоке и распределяется достаточно неравномерно.

Характер и степень взаимосвязи морфометрических параметров водосборов и величин модулей стока показаны в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции модулей стока и морфометрических параметров водосборов

Модуль стока	Площадь	Периметр	Длина основного потока	Отметки рельефа			Превышение	Уклон
				Минимальные	Максимальные	Средние		
$M_{\text{речн.}}$	-0,61	-0,50	-0,46	-0,75	-0,23	-0,52	-0,06	0,65
$M_{\text{пов.}}$	-0,60	-0,49	-0,46	-0,79	-0,26	-0,58	-0,08	0,61
$M_{\text{подз.}}$	-0,58	-0,49	-0,45	-0,52	-0,07	-0,23	0,06	0,76
$M_{\text{подз-гл.}}$	-0,53	-0,47	-0,48	-0,41	-0,16	-0,20	-0,07	0,71

Для всех модульных характеристик стока установлены значимые положительные связи с уклоном базисной поверхности и отрицательные – с площадью водосборов. При этом, наиболее тесной

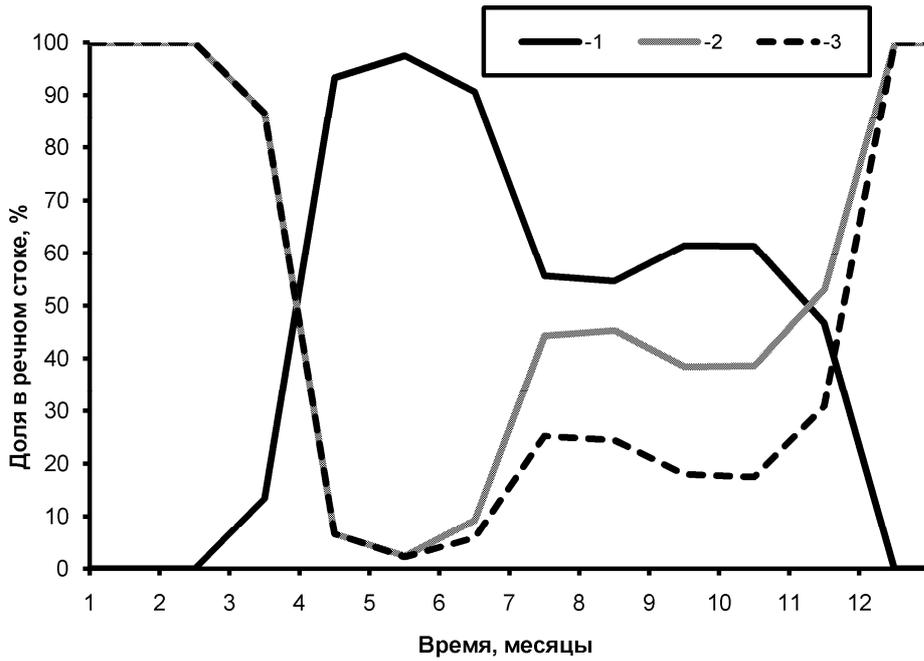


Рис. 2. Усредненное соотношение генетических составляющих речного стока: 1) поверхностный сток; 2) подземный сток; 3) глубинная составляющая подземного стока

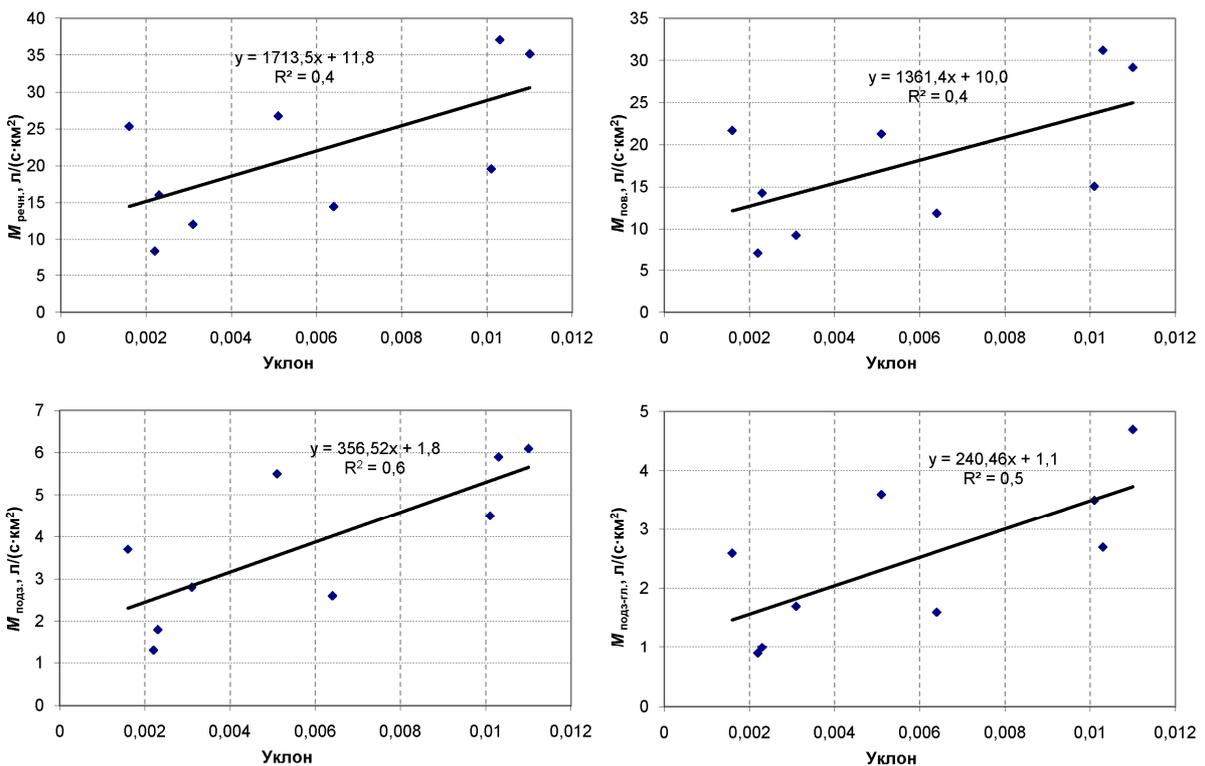


Рис. 3. Графики зависимости модуля (речного, поверхностного, подземного и подземного глубинного) стока от уклона базисной поверхности

связью с уклонами отличаются модули подземного стока (значения коэффициентов парной корреляции составляют 0,71...0,76).

Отмечены значимые величины коэффициентов корреляции для 0,10 уровня значимости.

Выводы

В результате проведенных исследований получены морфометрические параметры водосборов более 1500 рек северной части Кузнецкого Алатау, для 10 крупных рек из них по данным многолетних

гидрометрических наблюдений определены величины речного стока и его составляющих (поверхностной, подземной и подземной глубинной), особенности их внутригодовой изменчивости, оценена взаимосвязь морфометрических параметров водосборов и величин модулей стока. Установлено, что наибольшие значения модульных характеристик стока приходится на водосборы бассейна р. Томи. Для всех модульных характеристик стока установлены значимые положительные связи с уклоном базисной поверхности, причем выявлено, что наиболее тесная корреляционная взаимосвязь прослеживается между уклонами базисной поверхности и модулями подземного стока. В целом, по-

лученные данные не противоречат общим закономерностям распределения характеристик стока, но применительно к северной части Кузнецкого Алатау позволяют оценивать их с большей степенью детальности.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки ресурсов подземных вод, разработки рекомендаций по оптимизации водопользования различного рода потребителей, для изучения вопросов формирования состава, качества подземных вод и оценки их геологической роли в разрушении горных пород, формировании месторождений полезных ископаемых гидрогенного типа и проч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комлев А.М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. – 163 с.
2. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1960. – 238 с.
3. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г. Подземные воды в водном балансе крупных регионов. – М.: Наука, 1989. – 124 с.
4. Дутова Е.М. Особенности геохимии подземных вод ряда золоторудных районов Алтае-Саянской складчатой области в связи с гидрогеохимическими поисками: автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 46 с.
5. Гидрогеология СССР. Том XVII. Кемеровская область и Алтайский край. Западно-Сибирское геологическое управление / под ред. М.А. Кузнецова, О.В. Постникова. – М.: Недра, 1972. – 399 с.
6. Природные воды Ширинского района республики Хакасия / Под ред. В.П. Парначева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 183 с.
7. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик.
8. Исследовательская программа SRTM NASA // Интернет-сайт NASA. – 2009. – 17 июня [электронный ресурс]. URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (дата обращения 10.01.2010).
9. Куделин Б.И. Подземный сток на территории СССР. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1966. – 303 с.

Поступила 18.01.2010 г.

УДК 624.131

УЧЕТ ПЕРЕУПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ В РАСЧЕТАХ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТУННЕЛЕЙ

Л.А. Строкова

Томский политехнический университет
E-mail: geyer@tpu.ru

Представлены результаты численного моделирования оседания земной поверхности при сооружении туннелей. Исследовано воздействие начального переуплотнения, выраженного через коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя на величину осадки. Показано, что этот параметр важно учитывать для переуплотненных глинистых грунтов.

Ключевые слова:

Мульда оседания, туннель, метод конечных элементов, коэффициент бокового давления грунта.

Key words:

Surface settlement trough, tunnel, finite element method, coefficient of earth pressure at rest.

Для расчета прочности и устойчивости грунтовых оснований в последние годы используется специальное геотехническое программное обеспечение (программы PLAXIS, Zsoil, FEModels, FLAC и другие). Характерной особенностью геотехнического программного обеспечения является возможность проводить расчеты с учетом стадийности устройства конструкции, моделировать про-

цессы экскавации грунта, возведения обделки туннеля, что способствует повышению точности расчетов.

При использовании программ в геотехнических расчетах по данным Европейского геотехнического сообщества особые трудности у пользователей вызывают определение и задание входных параметров; определение начальных условий; выбор под-