Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXII, вып. 2, 1971 г.

К ОЦЕНКЕ ПОДЗЕМНОГО СТОКА НА ЮГЕ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

А. И. Зеленой, В. А. Кирюхин

Существующие методы изучения и количественной оценки подземного стока [7, 8] практически применимы лишь при наличии данных длительных наблюдений за режимом природных вод на густой сети опорных пунктов. Юг Дальнего Востока (ДВ) гидролого-гидрогеологически слабо изучен. Для комплексного решения проблемы подземного стока даже в региональном аспекте, не говоря уже о сложных условиях горных районов, эти методы непригодны [8].

Наиболее эффективным в настоящее время является комплексный гидролого-гидрогеологический метод расчленения речного стока на генетические составляющие по источникам питания. Поскольку нет единой разработанной генетической теории стока дальневосточных рек и особенно их горных частей, существуют самые различные воззрения по вопросам формирования, распределения и режима речного стока и его составляющих. Слабая гидрогеологическая изученность территории не обеспечивает надежного учета гидродинамического фактора формирования подземного стока (питания) рек, поэтому исследователи используют различные упрощенные схемы расчленения гидрографов. Чаще всего пользуются способом А. Н. Бефани [1] в модификации В. К. Ситникова [11], который основан на предположении плавного увеличения запасов подземных вод в водосборах в период летних муссонных дождей и закономерного их истощения в зимний период. Подземная составляющая стока рек выделяется прямой срезкой, восходящей от последнего зимнего расхода до максимума в начале ледостава на реках, якобы (?) фиксирующего полный переход их на подземное питание. Способ слабо учитывает внутригодовую динамичность подземного стока и ведет к общему занижению роли подземных вод в формировании речного стока. Более рационально отыскивать максимальные величины подземного стока на кривой истощения в точках, соответствующих переходу среднесуточных температур воздуха через 0° С (на их спаде), когда водноатмосферное питание подземных вод практически прекращается (рис. 1).

Слабый количественный учет фактической динамики подземного стока, несоответствие принимаемых схем расчленения фактическим условиям дренирования речных водосборов [8] порождают весьма противоречивые суждения об удельной роли подземных вод в общем балансе стока территории. А. Б. Разживин [9], например, оценивает подземное питание рек горного Сихотэ-Алиня в 50—60%, В. К. Ситников — в 7—50% для всего юга ДВ. Ряд авторов ограничивает роль подземного питания рек территории всего лишь в 1—7% от общего стока.

Причиной расхождений является различное понимание термина *подземный сток*. В. К. Ситников, например, при расчетах подземного питания рек не рекомендует учитывать талый сток наледей. Кроме того, он считает, что к подземному стоку не следует относить воды подповерхностного стока. Поэтому региональная карта подземного стока для юга ДВ [7], в основу которой легли материалы исследований В. К. Ситникова, иллюстрирует лишь общие закономерности географии подземного стока и не дает количественной оценки его генетических составляющих.

Морфометрический способ изучения позволяет усовершенствовать методы оценки и картирования подземного стока и получить более точную количественную характеристику его для юга ДВ. На рассматриваемой территории четко выражен паводочный режим рек. Условия формирования речного стока для среднего года можно записать общим уравнением баланса

$$У = У_{н.\,п} + У_{г.\,н} + У_{г.\,п} + У_{п.\,п} + У_{п.\,с}, \qquad (1)$$

где $У$ — норма стока реки; $У_{н.\,п}$ — норма подземного питания реки из напорных водоносных горизонтов и зон; $У_{г.н}$ — норма грунтового питания с нисходящим режимом стока; $У_{г.\,п}$ — норма грунтового питания с подпорным режимом стока; $У_{п.\,п}$ — норма подповерхностного питания реки за счет верховодки; $У_{п.\,с}$ — норма поверхностного склонового питания реки.

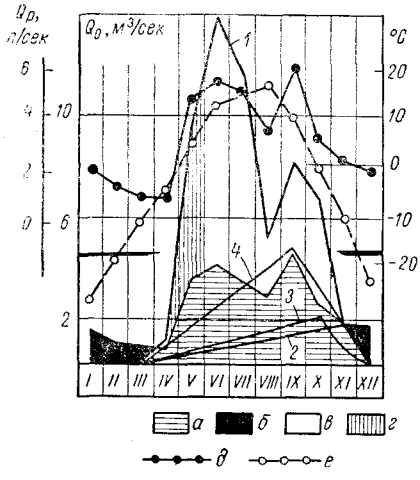


Рис. 1. Графический расчленение гидрографов рек

1 — по детальному гидролого-гидрогеологическому методу (*а* — устойчивая подземная составляющая; *б* — объем наледей — наледный сток; *в* — подповерхностная составляющая подземного стока; *г* — кривая режима опорных родников; *д* — кривая среднемесячных температур, пос. Горный); *2* — выделение устойчивой подземной составляющей по методу А. Н. Бефани; *3* — по методу В. К. Ситникова; *4* — по гидрометеорологическим данным

Подземное питание из напорных водоносных горизонтов поступает с глубин в десятки — сотни метров. Оно сравнительно устойчиво и легко выделяется на гидрографах рек по зимней межени.

Грунтовое питание реки получают за счет подземных вод зоны свободного водообмена (выше местного базиса эрозии). Динамичность грунтового питания возрастает по мере увеличения высоты и глубины эрозионного расчленения водосборов.

В периоды атмосферного увлажнения бассейнов в почвенном слое и зоне аэрации междуречий образуется сезонный подповерхностный подземный сток. Он отличается бо́льшей динамичностью по сравнению с грунтовым, что приближает его к поверхностному (склоновому) стоку $У_{п.\,с}$, вместе с которым он образует высокую летне-осеннюю муссонную паводочную волну расходов. Подповерхностный сток составляет значительную долю общего стока (до 30—70%), но из-за кратковременности и периодичности существования не учитывается при оценке ресурсов подземных вод. С учетом гидродинамических особенностей составляющих речного стока, подземное питание рек по гидрографу можно рассчитать по уравнению

$$У_{н.\,п} = У_{у.\,п} + У_{пав}, \qquad (2)$$

где $У_{у.п}$ — устойчивое подземное питание рек, которое определяется грунтовым и напорным питанием и характеризует основные ресурсы

подземных вод; $У_{пав}$ — паводочное питание рек, слагающееся из весьма динамичных подповерхностной составляющей подземного питания и поверхностного питания рек.

Гидрологоморфометрический метод был использован А. И. Зеленым для количественной оценки подземного стока Нижнего Приамурья. При исследовании географии подземного стока этой территории была выявлена интересная в методологическом отношении региональная связь между высотными параметрами речных водосборов $H_{ср}$ и средними отметками речных русел $h_{ср}$ (рис. 2), аппроксимируемая параболической зависимостью *

$$H_{ср} = -0{,}00085h_{ср}^2 + 2{,}09h_{ср} - 54. \qquad (3)$$

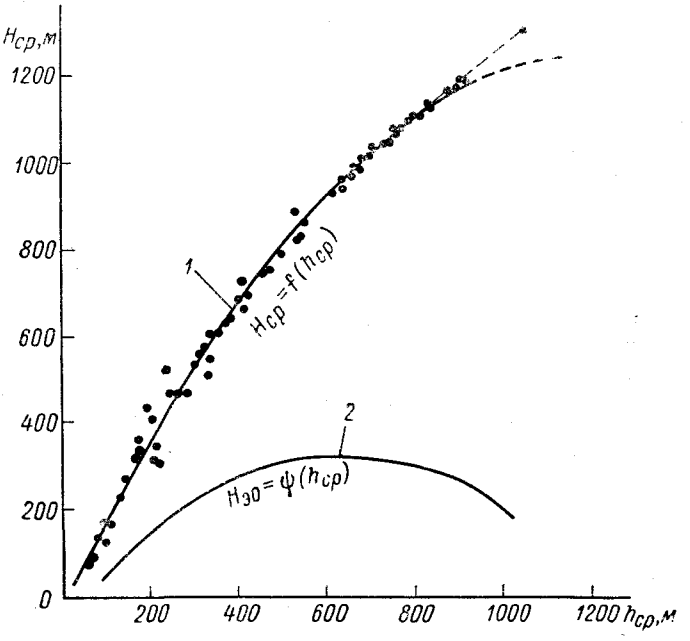


Рис. 2. Зависимость между средней высотой водосборов, средней отметкой русел рек Нижнего Приамурья (*1*) и средней глубиной эрозионного вреза (*2*)

Эта зависимость устанавливает сходные условия дренированности речных водосборов в различных географических, структурных и гидрогеологических условиях, независимо от их порядка, размеров (F = 1 — 41 000 *км*^{2}) и высотного положения ($H_{ср}$ = 130—1300 *м*). При этом количественным показателем степени дренированности междуречий может служить средняя по бассейну глубина эрозионного вреза [10]

$$H_{эр} = H_{ср} - h_{ср}, \qquad (4)$$

где $H_{ср}$ — средняя высота водосбора, *м* в абс. отметках; $h_{ср}$ — средняя отметка русла реки, *м* в абс. отметках.

Эмпирическая кривая *2* (рис. 2) отвечает уравнению (4) и отражает пространственное изменение глубины эрозионного вреза речных бассейнов: достигая максимума в горах, она уменьшается к головным и нижним

* Объективность подобных зависимостей была подтверждена картографическим отделом ГГИ в районах Средней и Верхней Волги, Сибирского нагорья, Кавказа и автором статьи на 300 бассейнах юга ДВ.

частям речных бассейнов. Кривая близка к функции гиперболического тангенса, входящего в расчетную формулу подземного питания рек юга ДВ [1]. Эта зависимость позволяет оценить объемы подземных водосборов

$$V_{\text{п.в.}} = H_{\text{эр}}F, \qquad (5)$$

где F — площадь бассейна на замыкающий створ, $км^2$; $V_{\text{пв}}$ — объем подземного водосбора, дренируемого рекой, $км^3$.

Тесная связь подземного стока с объемом подземных водосборов при коэффициенте корреляции 0,959 выражается зависимостью

$$Q_{\text{у. п}} = 0{,}0398V_{\text{п. в}}^{0{,}894}, \qquad (6)$$

где $Q_{\text{у. п}}$ — норма подземного устойчивого питания рек (естественные ресурсы подземных вод), $м^3/сек$.

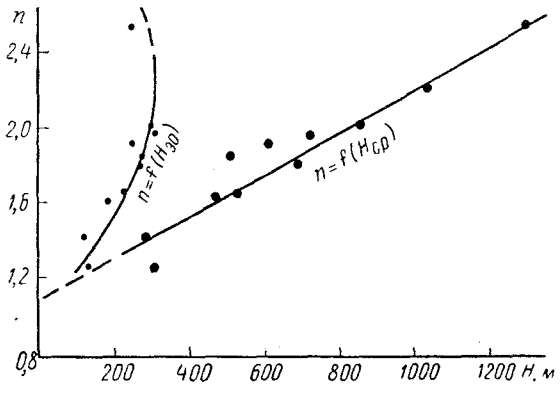


Рис. 3. Зависимость переводного коэффициента «на динамичность» подземного стока от средней высоты водосборов и средней глубины эрозионного расчленения

Величина $Q_{\text{у.п}}$ для горных рек Приамурья определялась детальным гидрологогидрогеологическим анализом гидрографов стока рек хребта Мяо-Чан с учетом многолетних наблюдений за режимом подземных вод [3]. Устойчивое подземное питание равнинных рек Приамурья оценивалось по графикам связи средних многолетних модулей подземного стока с модулями речного стока в ноябре.

Зависимость (6), как показал анализ, можно принять за основу для массовых расчетов величин подземного стока (ресурсов подземных вод) в бассейнах любого порядка Нижнего Приамурья. Сопоставление данных, полученных по формуле (6), с результатами расчетов В. К. Ситникова показывает, что занижение величины подземного стока этим автором для большинства речных бассейнов территории объясняется недоучетом изменений его динамичности с высотой. Ошибки расчетов В. К. Ситникова возрастают от равнины к горам, с увеличением дренирующего влияния рек. Для каждого конкретного речного бассейна [8] ошибки расчета можно оценить в виде поправочного коэффициента «на динамичность» (рис. 3)

$$n = 0{,}0011H_{\text{ср}} + 1{,}8. \qquad (7)$$

Отклонения от региональной зависимости (6) для большинства бассейнов редко превышают 20—30%. Наблюдаемое рассеивание точек объясняется неизбежными ошибками определения морфометрических параметров бассейнов и проявлением некоторой локальности связей вида $H_{\text{ср}} = f(h_{\text{ср}})$ для крупных ассоциаций речных водосборов (рис. 4), отвечающих определенным округам поверхностного и подземного стока. График $H_{\text{ср}} = f(h_{\text{ср}})$ для юга ДВ отражает увеличение степени дренированности округов стока в широтном направлении, с запада на восток.

Обладая высокими «интерполяционными» качествами, зависимости вида $Q_{\text{у. п}} = f(V_{\text{п. в}})$ позволяют по-новому подойти к картированию подземного стока в изолиниях объемного модуля [7]

$$M_{\text{п. }V} = \frac{Q_{\text{у. п}}}{V_{\text{п. в}}} 10^3, \ л/сек\ км^3. \qquad (8)$$

Такая карта подземного стока, составленная на топографической основе, позволяет быстро и надежно оценивать естественные ресурсы подземных вод как в региональном аспекте, так и для малых бассейнов, до-

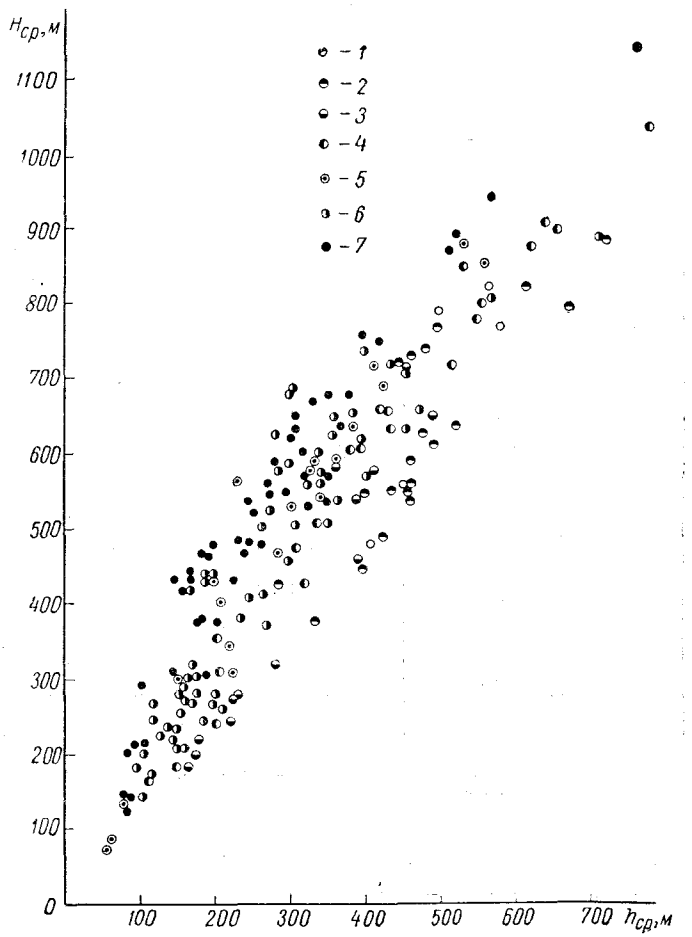


Рис. 4. Зависимость между высотными параметрами речных водосборов и русел по отдельным округам стока

1 — Верхне-Амурский; *2* — Амуро-Зейский; *3* — Селемджинский; *4* — Буреинский; *5* — Нижне-Амурский; *6* — Уссурийский, *7* — Японский

пуская при этом проведение массовых расчетов площадного модуля стока, необходимого при воднобалансовых расчетах,

$$M_{\text{п. п}} = \frac{Q_{\text{у. п}}}{F} = M_{\text{п. }V} H_{\text{эр}}, \ л/сек \ км^3, \tag{9}$$

тогда

$$M_{\text{п. }V} = \frac{M_{\text{п. п}}}{H_{\text{эр}}}. \tag{10}$$

Равенство (10) показывает, что объемный модуль — это величина подземного стока с единицы площади бассейна, отнесенная к единице глубины его эрозионного расчленения. Это обстоятельство позволяет применять высотный (гипсометрический) принцип интерполяции модуля как при построении карты стока, так и при практическом ее использовании.

Рисовка изолиний объемного модуля подземного стока, хорошо согласующихся с изогипсами рельефа, отражает изменение гидрогеологических условий (динамики стока) по территории, по отдельным речным бассейнам и их высотным зонам. Четко отражая высотно-поясное распределение подземного стока, карта фиксирует динамическую зональность вод в различных структурных, геологических и гидрогеологических условиях. Зональное распределение подземного стока отражает воздействие многочисленных природных факторов формирования подземных вод. Для каждого из округов стока (рис. 4) устанавливаются характерные средние зависимости $H_{ср} = f(h_{ср})$ и $M_{пV} = f(V_{пв})$ (см. таблицу).

Географическая характеристика округов стока

Округ стока	Величина $M_{п.\ V}$	Соотношение площадей основных гидрогеологических структур АБ : АД : СБ : ГГМ *	Количество выпадающих осадков, *мм/год*	Мощность многолетней мерзлоты, *м*
1	$0{,}0258V_{п.\ в}^{-0{,}146}$	7,5 : 1 : 0 : 1,5	До 400	50—100
2	$0{,}0270V_{п.\ в}^{-0{,}059}$	7 : 0 : 0 : 3	500—600	50—100
3	$0{,}0291V_{п.\ в}^{-0{,}029}$	4 : 0 : 1 : 5	500—800	50—100
4	$0{,}0376V_{п.\ в}^{-0{,}088}$	2 : 0 : 0,5 : 7,5	600—900	25—50
5	$0{,}0404V_{п.\ в}^{-0{,}104}$	3 : 1 : 1 : 5	600—1000	5—10
6	$0{,}0179V_{п.\ в}^{-0{,}019}$	1,5 : 1 : 1 : 6,5	600—800, до 1000	0
7	$0{,}0303V_{п.\ в}^{-0{,}089}$	0,5 : 1 : 5 : 3,5	800—1050	0

* АБ — артезианские бассейны; АД — адартезианские бассейны; СБ — вулканогенные супербассейны; ГГМ — гидрогеологические массивы.

Не останавливаясь на гидрогеологической характеристике территории юга ДВ [4, 5, 6], отметим лишь основные особенности выделенных округов стока (см. таблицу, рис. 4).

Округ *1* расположен в верхней — средней частях бассейна р. Амур, на северо-западной окраине территории, охватывая слабо расчлененные гидрогеологические массивы (Ольдойский, Гонжинский и др.), Верхне-Амурский адартезианский бассейн, западную часть Нижне-Зейского артезианского бассейна (по терминологии И. К. Зайцева, Н. И. Толстихина [2]).

Округ *2* включает бассейн р. Зеи (без притока Селемджи). В его пределах расположены Верхне-Зейский артезианский бассейн и большая часть Нижне-Зейского, сильно расчлененные Тукурингрский и Мамынский гидрогеологические массивы.

Округ *3* приурочен к бассейну р. Селемджи, включающему сильно расчлененный Джагдинский гидрогеологический массив и северо-восточную часть Нижне-Зейского артезианского бассейна.

Округ *4* охватывает бассейн р. Буреи, на окраинах которого расположены Туранский и Буреинский гидрогеологические массивы и Буреинский артезианский бассейн.

Округ *5* — наибольший по размерам, приурочен к бассейну Нижнего Амура (без р. Уссури). В его пределы входит ряд артезианских бассейнов (Средне- и Нижне-Амурский, Удыль-Кизинский, Эворон-Чукчагирский

и др.), сильно расчлененные гидрогеологические массивы (Мало-Хинганский, Баджальский, Чаятынский, частично Западно-Сихотэ-Алиньский), а также небольшие по площади адартезианские бассейны.

Округ *6* включает бассейн р. Уссури, где расположены Уссури-Ханкайский и серия малых артезианских бассейнов, Западно-Сихотэ-Алиньский, Нижне-Бикинский, Свиягинский и Гродековский гидрогеологические массивы.

Округ *7*, приуроченный к восточной окраине территории, охватывает бассейны Японского моря. Сюда входят Восточно-Сихотэ-Алиньский гидрогеологический массив, ряд крупных вулканогенных супербассейнов с несколькими адартезианскими бассейнами.

В западных округах стока (*1—3*) наибольшее развитие получили артезианские бассейны с наименьшими величинами эрозионного расчленения (минимальной дренированностью), с которыми связаны сравнительно низкие величины подземного стока (см. таблицу). Вместе с тем эти округи характеризуются наибольшими статическими запасами подземных вод. В восточных округах стока (*4—7*) основные ресурсы подземных вод связаны с гидрогеологическими массивами и вулканогенными супербассейнами, с обратной картиной соотношения динамических и статических запасов подземных вод.

Несколько обособлен Уссурийский округ стока (*6*), приуроченный к затененному, сравнительно слабо увлажненному западному склону Сихотэ-Алиня. Внутри округа отмечается общая картина увеличения естественных ресурсов подземных вод с высотой, от артезианских бассейнов к гидрогеологическим массивам.

Выводы

Приведенные результаты первой попытки практического применения морфометрического метода к изучению подземного стока на обширных площадях соответствуют рекомендациям, принятым на III Всесоюзном гидрологическом съезде: исследования подземного питания рек должны проводиться на основе анализа гидрогеологических, геологических и геоструктурных условий конкретных речных бассейнов с учетом режима подземного стока из всех водоносных пластов зоны дренирования [8].

Выявленные зависимости пространственного распределения подземного стока дают комплексную информацию об условиях формирования подземных вод в различных природных условиях речных бассейнов, независимо от их географического и высотного положения. Обладая высокими интерполяционными качествами, они открывают дорогу «ключевому» методу исследований проблемы подземного стока как в гидрологии, так и гидрогеологии.

Изучение подземного стока на основе комплекса методов гидрологии, гидрогеологии и морфометрии соответствует требованиям географо-гидрологического метода исследований всех природных вод, способного, по свидетельству В. Г. Глушкова [8], устанавливать причинные (генетические) связи всех вод с географическим ландшафтом в целом, и на основе этих связей устанавливать характеристики самих вод. Несомненный интерес в этом отношении представляет опробование морфометрического метода в общих исследованиях природных вод с учетом качественных и количественных характеристик по отдельным их составляющим (как водным, так и химическим).

Предложенный метод выгодно упрощает методику составления карт подземного стока, повышая вместе с тем их практическое значение. Обладая высокими расчетными качествами, такие карты позволяют проводить

массовые расчеты естественных ресурсов подземных вод как в региональном плане, так и для отдельных водных объектов.

Дальнейшие экспериментальные разработки методов определения исходных расчетных параметров речных бассейнов несомненно позволят выявить новые закономерности географии подземного стока, развить генетическую теорию стока всех природных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бефани А. Н. Вопросы теории и расчета подземного стока. Тр. III Всесоюзн. гидролог. съезда, т. IX. Гидрометеоиздат, 1959.
2. Зайцев И. К., Толстихин Н. И. Основы структурно-гидрогеологического районирования СССР. В сб. «Материалы по региональной и поисковой гидрогеологии». Госгеолтехиздат, 1963.
3. Зеленой А. И. Об оценке подземного стока горного Мяо-Чана и смежных с ним районов Нижнего Приамурья. Изв. ВУЗов, Геология и разведка, № 3, 1969.
4. Караванов К. П. Гидрогеологическое районирование Хабаровского края и Амурской области. В сб. «Мерзлотно-гидрогеотермические и гидрогеологические исследования на Востоке СССР». Наука, 1967.
5. Кирюхин В. А. Гидрогеологические особенности юга Дальнего Востока. Докл. географ. об-ва СССР, вып. 2, 1967.
6. Кладовщиков В. Н. Гидрогеологическое районирование Приморья. Сов. геол., № 5, 1965.
7. Подземный сток на территории СССР. Изд-во МГУ, 1966.
8. Попов О. В. Подземное питание рек. Гидрометеоиздат, 1968.
9. Разживин А. Б. О роли грунтового питания рек горной области Сихотэ-Алиня. Бюлл. МОИП, отд. геолог., № 2, 1964.
10. Рохмистров В. Л. О зависимости минимального стока от физико-географических условий речных бассейнов. Метеорология и гидрология, № 9, 1963.
11. Ситников В. К. Подземное питание рек Дальнего Востока. Тр. ГГИ, вып. 114, 1964.