

УДК 550.42:57.4

СПОСОБ РАСЧЕТА И ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ

Моисеева Юлия Александровна¹,
julchiky@mail.ru

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Знание палеогидрогеологических условий является важным фактором в решении задач оценки ресурсов подземных вод и их качества, поисков полезных ископаемых, проектировании полигонов бытовых и промышленных отходов, а также необходимым условием разработки методов долгосрочного прогноза изменений окружающей среды. В решении ряда таких задач для исследуемого региона определяющую роль играют процессы водообмена (общего и подземного).

Цель исследования: разработка и обоснование методики палеогидрологических реконструкций подземного стока, построение математической модели на ее основе и выявление долгосрочных изменений подземного стока в Западной Сибири и факторов, их определяющих.

Методы: географо-гидрологический и статистические методы, математическое моделирование гидрологических и гидрогеологических процессов.

Результаты и выводы. Предложена методика палеогидрологических реконструкций подземного стока. На основе опубликованных среднемноголетних данных построена математическая модель. Получены выводы о вероятностных изменениях суммарного и подземного стока при пяти различных сценариях изменения температуры воздуха и атмосферного увлажнения. Выявлена зависимость между годовым подземным стоком от суммы атмосферных осадков за тёплый период и коэффициента суммарного стока; на основе этой зависимости разработана и апробирована методика реконструкции подземного стока на примере водосборов рек Чузик (южно-таёжная подзона, элемент речной сети Оби) и Турухан (граница северной тайги и лесотундры, приток Енисея); показано, что увеличение подземного стока возможно при росте атмосферных осадков и при похолодании; уменьшение подземного стока определяется, прежде всего, уменьшением атмосферного увлажнения и ростом заболоченности.

Ключевые слова:

Подземный сток, палеогидрологические реконструкции, математическое моделирование, Западная Сибирь, атмосферное увлажнение.

Введение

Знание палеогидрогеологических условий является ключом к решению целого ряда гидрогеологических, геоэкологических, геохимических задач и необходимым условием разработки методов долгосрочного прогноза изменений окружающей среды. В частности, при проектировании объектов нефтегазового комплекса Западной Сибири нужно учитывать очень высокую и прогрессирующую заболоченность региона [1, 2], которая обусловлена сочетанием избыточного увлажнения и слабой дренированности водосборов. Последний фактор, в свою очередь, связан с общим и подземным водообменом, что и определило цель исследования – выявление изменений подземного водного стока. Исследование выполнено в продолжение работ по реконструкции гидрологических условий на двух типовых участках – водосборах рек Чузик (элемент системы Чузик – Парабель – Обь – Карское море; южно-таёжная подзона) и Турухан (элемент системы Турухан – Енисей – Карское море; граница северной тайги и лесотундры). Более подробная характеристика указанных рек приведена в [3].

Методика исследования включала в себя три основных этапа: 1) обоснование способа расчёта подземного стока; 2) разработку математической модели подземного стока; 3) реконструкцию подземного стока на основе разработанной модели.

Для апробации модели подземного стока, как и в случае реконструкции суммарного стока рек Чузик и Турухан [3], использовались опубликованные среднемноголетние данные, полученные для 38 средних рек Сибири за условно однородные периоды (средние реки с площадью водосбора от 2000 до 50000 км² выбраны с учётом зональных условий формирования их стока). Кроме того, при обосновании способа расчёта подземного стока использованы данные о среднемесячных уровнях подземных вод на режимных скважинах государственной наблюдательной сети в Томской области [4–6], уровнях и расходах вод рек Парабель у с. Новиково, Тым у с. Напас, Кеть у п. Максимкин Яр, Чая у с. Подгорное, Васюган у с. Средний Васюган [7, 8].

Обоснование способа расчёта подземного стока

В настоящее время проблема оценки современного подземного стока неоднократно поднималась в работах [9–16]. Достаточно часто используется метод расчленения гидрографа, основанный на допущении о равенстве подземного стока и подземной составляющей речного стока, причём обычно в предположении преобладания подпорного режима взаимодействия речных и подземных вод. Однако в долинах равнинных рек Западной Сибири даже с

сильно заболоченными водосборами в ряде случаев наблюдается нисходящий режим. В целом можно отметить, во-первых, сохраняющуюся до сих пор неопределённость соотношения понятий «подземный сток» и «подземная составляющая речного стока» [14]. Во-вторых, подпорный режим в период весеннего половодья в регионе наблюдается только в пойме, в то время как поступление подземных вод в долину обычно приурочено именно к половодьям и паводкам (рис. 1).

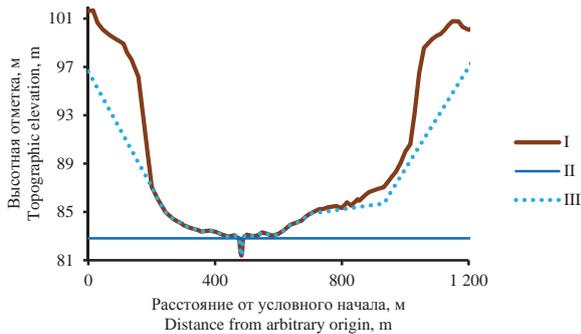


Рис. 1. Поперечный профиль долины реки Колга (элемент сети Колга–Чижалка–Васюган–Обь); условные обозначения: I – поверхность долины и русла; II – уровень воды в реке Колга (середина июня; спад половодья); III – уровень грунтовых вод (измерения проводились одновременно с измерением уровня речных вод)

Fig. 1. Cross-section of Kolga River Valley (Kolga–Chizhapka–Vasyugan–Ob); symbols: I is the surface of the valley and the river course; II is the water level in Kolga River (mid-June); III is the groundwater level

С учётом этого в работе [7] был рассмотрен способ восстановления среднемесячных расходов подземных вод по регрессионным зависимостям от

уровней подземных вод вида (1), которые, в свою очередь, базируются на: 1) использовании формулы Дюпюи; 2) представлении инфильтрации в виде линейной функции уровня подземных вод; 3) допущении, что график зависимости, полученной за зимний период (когда речной сток примерно равен подземному), существенно не меняется в весенний и летне-осенний периоды:

$$Q_{gr(Z)i} = a_0 + a_1 Z_{gr,i} + a_2 (Z_{gr,i}^2 - Z_r^2), \quad (1)$$

где $Q_{gr(Z)}$ – расход подземных вод в i -месяц; Z_{gr} и Z_r – уровни подземных и речных вод в i -месяц; a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты регрессии. Апробация этого способа была выполнена ранее в [7] по данным наблюдений за период до 2005–2007 гг. Авторами была уточнена оценка подземного стока в водосборах рек Васюган, Парабель, Чая, Тым, Кеть и соответствующие параметры a_0 , a_1 , a_2 за счёт использования более длинных рядов (до 2012–2015 гг.) и приводеки к среднемноголетним значениям суммарного стока (табл. 1).

Величины квадрата корреляционного отношения R^2 между измеренными (в зимний период) и вычисленными по уравнению (1) значениями во всех случаях были выше критического значения 0,36 [17, 18], что свидетельствует о возможности использования данного способа оценки подземного стока в качестве базового. Однако у него имеется и существенный недостаток, связанный с отсутствием или ограниченностью во многих случаях гидрогеологических наблюдений. Принимая это во внимание, было проведено сопоставление значений подземного стока в водосборах рек Васюган, Парабель, Чая, Тым, Кеть, полученных по уравнению (1) и в результате линейной интерполяции между

Таблица 1. Оценки подземного стока и параметры расчётных уравнений (1)

Table 1. Assessment of groundwater flow and the calculated parameters of equations (1)

Река–створ River–cross section	Номер скважины (возраст отложений) Well number (sediment age)	$Q_{gr(II)}$, м ³ /с (m ³ /s)	$Q_{gr(Z)}$, м ³ /с (m ³ /s)	$Q_{gr(Z)}/Q_{gr(II)}$	Коэффициенты регрессии (1) и погрешности их определения The regression coefficients (1) and errors in their definition			R^2
					$a_0 \pm \delta_a$	$a_1 \pm \delta_a$	$a_2 \pm \delta_a$	
р. Васюган – с. Средний Васюган Vasyugan River – Sredniy Vasyugan	169p ($Q_{II}tb + 2Q_{III}tb$)	44,3	82,0	1,85	–	4,80±0,82	–0,37±0,08	0,44
р. Парабель – с. Новиково Parabel River – Novikovo	129p (P_1lg)	23,1	39,7	1,72	–3123,60±196,68	43,87±2,43	–0,17±0,02	0,93
р. Чая – с. Подгорное River Chaya – Podgornoe	94p (Q_{III})	41,4	42,3	1,02	–	0,10±0,04	0,10±0,01	0,38
р. Тым – с. Напас River Tym – Napas	156p ($aQ_{I,II}tb + P_1It + P_2nm$)	67,2	102,7	1,53	–6021,27±1258,39	94,41±19,56	1,00±0,39	0,53
р. Кеть – п. Максимкин Яр River Ket – Maksimkin Yar	113p ($2aQ_{II}tb + N_1$)	98,3	152,8	1,55	–	68,90±20,99	–0,45±0,10	0,45

Примечание: $Q_{gr(Z)}$ – расход подземных вод, рассчитанный по зависимости (1); $Q_{gr(II)}$ – расход подземных вод, рассчитанный по зависимости (2); R^2 – квадрат корреляционного отношения для уравнения (1); приводека выборочных средних к среднемноголетним значениям проводилась путём умножения на соотношение (Q_p/Q_n), где Q_p – выборочное среднее значение суммарного стока; Q_n – среднее многолетнее значение суммарного стока по [7].

Note: $Q_{gr(Z)}$ is the groundwater discharge, calculated from the dependence (1); $Q_{gr(II)}$ is the groundwater discharge, calculated from the dependence (2); R^2 is the square of correlation relation for (1); selected average dates were reduced to the average long-term values by multiplying by the ratio (Q_p/Q_n), where Q_p is the sample mean total runoff; Q_n is the long-term average value of the total flow, according to [7].

расходами воды в зимнюю межень (в рассматриваемом регионе – с декабря по март), когда речной сток в первом приближении может рассматриваться как подземный:

$$Q_{gr(i),i} = \begin{cases} Q_{r,12} + (Q_{r,12} - Q_{r,3})(i-3)/9, & i = 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; \\ Q_{r,i}, & i = 1, 2, 3, 12, \end{cases} \quad (2)$$

где $Q_{gr(i)}$ – расход подземных вод в i -месяц календарного года; Q_r – расход воды в реке в i -месяц. В результате установлено, что соотношение $Q_{gr(z)}/Q_{gr(i)}$ изменяется в диапазоне от 1,02 до 1,85 (рис. 2), что позволяет использовать уравнение (2) для оценки минимального (базового) подземного стока.

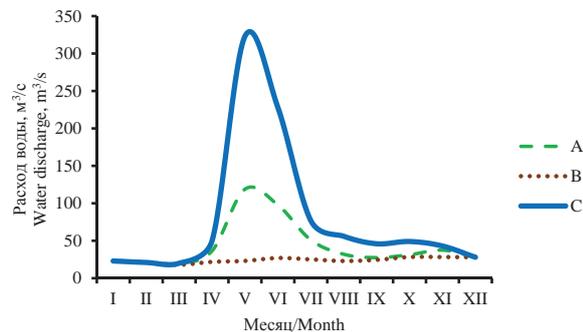


Рис. 2. Гидрограф реки Парабель в створе с. Новиково; условные обозначения: А – расход подземных вод по (1); В – расход подземных вод по (2); С – суммарный расход воды

Fig. 2. Hydrograph of the Parabel River at the cross section in village Novikovo; symbols: A is the groundwater discharge by equation (1); B is the groundwater discharge by equation (2); C is the total water discharge

Разработка математической модели подземного стока

Для реконструкции подземного стока должна использоваться модель, которая одновременно должна адекватно описывать гидрогеологические условия и основываться на минимуме доступной исходной информации (обычно это – средние за какой-либо период значения температуры атмосферного воздуха и суммы атмосферных осадков, вычисленные косвенно по остаткам растительности, фауны и так далее). С учётом этого допустим, что параметры уравнения (3) могут быть представлены в виде (4–6):

$$Q_{gr,a} = k_f m B J_{gr}, \quad (3)$$

$$m \approx k_1 L J_s \left(\frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2}, \quad (4)$$

$$B \approx \frac{F}{L}, \quad (5)$$

$$\tau \approx \frac{L}{k_3 J_s} \approx \frac{Z_{gr,b} - Z_{gr,e}}{k_4 H_{T>0}^{k_5}}, \quad (6)$$

где $Q_{gr,a}$ – средний расход подземных вод; k_f – коэффициент фильтрации; B – ширина потока подземных; F – площадь водосбора реки; L – длина реки; J_{gr} – напор (уклон подземных вод); J_s – средневзвешенный уклон реки; m – мощность водоносного горизонта; Y_a – средний слой суммарного речного стока; H_a – средний слой атмосферных осадков; $H_{T>0}$ – сумма атмосферных осадков за период с положительной температурой атмосферного воздуха; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – коэффициенты регрессии; $Z_{gr,b}$ и $Z_{gr,e}$ – уровни подземных вод в начале (в замыкающем створе реки) и конце участка (в истоках реки); τ – время перемещения водных масс на расстояние L при падении уровня подземных вод $\Delta Z_{gr} = Z_{gr,b} - Z_{gr,e}$ ($J_{gr} \approx \Delta Z_{gr}/L$). Тогда уравнение (3) может быть приведено к виду:

$$M_{gr,a} = \frac{Q_{gr,a}}{F} = \frac{k_f k_1 k_4}{k_3} H_{T>0}^{k_5} \left(\frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2} = k_6 H_{T>0}^{k_5} \left(\frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_2}, \quad (7)$$

где $M_{gr,a}$ – средний модуль подземного стока; k_6 – коэффициенты регрессии.

Физический смысл уравнения (7) заключается в выделении зависимости модуля подземного стока от инфильтрационного питания и степени обводнённости горных пород. Инфильтрация наблюдается преимущественно в тёплый период года, а степень обводнённости коррелирует с коэффициентом стока Y_a/H_a . Апробация модели (7) была выполнена по 38 средним рекам Сибири (с площадью водосбора от 2000 до 50000 км²). Сведения об использованной исходной информации приведены в [3]. В результате получены следующие значения параметров модели ($M_{gr,a}$ в л/(с·км²), $H_{T>0}$, Y_a , H_a – в мм/год): $k_2 = 1,197 \pm 0,123$; $k_5 = 0,268 \pm 0,025$; $k_6 = 1$; $R^2 = 0,76$ (рис. 3).

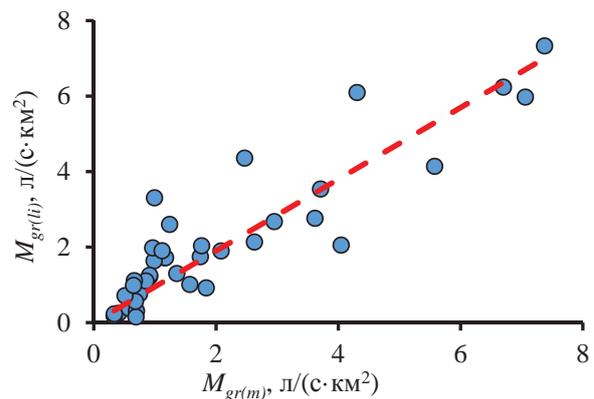


Рис. 3. Соотношение между средними значениями модуля подземного стока $M_{gr(i)}$, вычисленными по уравнению (2), и модуля подземного стока $M_{gr(m)}$, рассчитанными по уравнению (7)

Fig. 3. Ratio between the average values of the rate of subsurface water flow (specific discharge) $M_{gr(i)}$ calculated according to the equation (2) and the rate of subsurface water flow $M_{gr(m)}$ calculated from equation (7)

Реконструкция подземного стока

Средние значения температуры атмосферного воздуха T_a и суммы годовых атмосферных осадков H_a (табл. 2) в разные периоды в течение последних 10000 лет приняты согласно [19–24]. Сумма среднемесячных положительных температур воздуха $\Sigma T_{>0}$ определялась по зависимости (8), сумма атмосферных осадков за тёплый период – по зависимости (10):

$$\Sigma T_{>0} = 68,197 \exp((0,059 \pm 0,003)T_a); R^2 = 0,80, \quad (8)$$

$$H_{T>0} = \exp(-1,111 \pm 0,361) H_a^{0,844 \pm 0,045} \times (\Sigma T_{>0})^{0,406 \pm 0,036}, \quad R^2 = 0,83, \quad (9)$$

где R^2 – квадрат корреляционного отношения. Более детально использованная методика восстановления климатической информации и состоянии территорий, соответствующих современным водосборам рек Чузик и Турухан, охарактеризована в [3]. Там же предложена и обоснована методика восстановления среднего (за однородные периоды) слоя суммарного стока Y_a с использованием следующих формул:

$$Y_a \approx \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \left(1 + \frac{C_{V_H} E_0^2}{2H_a^2}\right); \quad (10)$$

$$E_0 = 0,3080(\Sigma T_{>0})^2 - 0,0021(\Sigma T_{>0})^3, \quad (11)$$

$$\mu = 0,343 \eta^{0,057} (f_F + 1)^{0,278} (f_M + 1)^{-0,108}, \quad (12)$$

$$\eta = \begin{cases} Z_b - 500, & Z_b > 500; \\ 1, & Z_b \leq 500, \end{cases} \quad (13)$$

где C_{V_H} – коэффициент вариации слоя атмосферного увлажнения; f_F – лесистость водосбора, %; f_M – заболоченность водосбора, %; коэффициенты регрессии в (8, 9) и эмпирические коэффициенты в формулах (11, 12) получены методом наименьших квадратов по данным о средних реках бывшего СССР [3]; Z_b – средняя высота водосбора, м (13). Принятые климатические и морфометрические характеристики и результаты расчёта суммарного стока рек Чузик и Турухан и их подземной составляющей приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что в лесотундре и южной тайге Западной Сибири наблюдаются несовпадающие по направлению и абсолютным значениям изменения элементов водного баланса, включая и подземный сток. Однонаправленных изменений суммарного и подземного стока за последние 8000–10000 лет не обнаружено, хотя нельзя не отметить тенденцию увеличения за последние 500 лет суммарного и подземного стока в водосборе реки Турухан в северо-западной части Западно-Сибирской равнины. За тот же период (последние 500 лет) в южно-таёжной подзоне (водосбор реки Чузик) при общем потеплении климата определённый рост суммарного и подземного стока наблюдается только в последние 50–60 лет (табл. 2). Подземная составляющая суммарного

стока реки Чузик изменяется от 18 до 21 %, реки Турухан – от 21 до 25 % (рис. 4).

Таблица 2. Результаты реконструкции суммарного и подземного стока с территорий, соответствующих водосборам рек Чузик и Турухан

Table 2. Results of reconstruction of the total and groundwater runoff from the territories relevant to catchment areas of the Chuzik and Turuhan rivers

Река- створ River- cross section	Расчёт- ный год Hydrolo- gical year	$T_a, ^\circ\text{C}$	H_a		f_F	f_M	Y_Y	Y_{gr}	Y/H
			мм/год mm/year	H ($T>0$)					
р. Чузик (с. Осипово) River Chuzik (Osipovo)	-8650	-4,7	548	334	0	0	67	12	0,12
	-7550	-3,0	548	348	10	0	113	23	0,21
	-6550	2,3	455	338	16	4	42	9	0,09
	-4250	0,1	538	369	30	12	83	16	0,15
	-1500	-3,0	548	348	47	22	121	25	0,22
	1960	-1,5	564	370	64	35	117	23	0,21
	2000	-1,2	578	380	68	35	122	24	0,21
р. Турухан (п. Янов Стан) River Turuhan (Yanov Stan)	-9350	-7,4	449	265	0		69	15	0,15
	-8650	-11,2	382	211	0		70	17	0,18
	-6550	-4,2	607	369	11	1	181	36	0,30
	-4250	-6,5	520	306	38		225	54	0,43
	-1500	-5,5	486	296	9		124	28	0,25
	1960	-8,3	610	336	37		331	72	0,54
	2000	-7,7	634	352	38		343	73	0,54

Примечание: T_a – средняя температура атмосферного воздуха; H_a – средняя сумма атмосферных осадков за год; $H_{T>0}$ – сумма атмосферных осадков за период с положительной температурой атмосферного воздуха; f_F и f_M – лесистость и заболоченность водосборной территории; Y_a – средний слой суммарного речного стока; $Y_{gr,a}$ – средний слой подземного стока.

Note: T_a is the average temperature of atmospheric air; H_a is the average sum of atmospheric precipitation for a year; $H_{T>0}$ is the amount of precipitation at positive air temperature; f_F and f_M are the forestness and marshiness of river basin; Y_a is the average sum of streamflow depth; $Y_{gr,a}$ is the average groundwater flow depth.

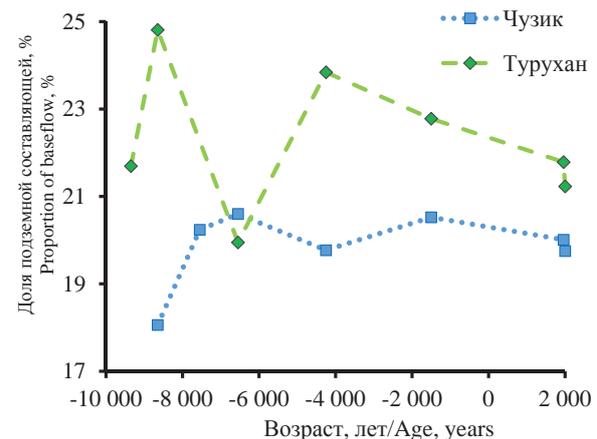


Рис. 4. Изменения доли подземного стока на территории водосборов рек Чузик (в створе с. Осипово) и Турухан (в створе п. Янов Стан)

Fig. 4. Changing in the proportion of groundwater flow at the total flow in the area of watershed Chuzik (in cross section Osipovo) and Turukhan rivers (in cross section Yanov Stan)

Для более полного понимания взаимосвязей между климатическими, гидрологическими и гидрогеологическими параметрами было выполнено моделирование изменений элементов водного баланса по уравнениям (7–11) при допущении $\mu \approx 1$ и $Cv_H \approx 0$ по пяти сценариям: I – увеличение средней температуры воздуха на $0,3^\circ\text{C}$ и атмосферных осадков на 14 мм/год ; II – увеличение средней температуры воздуха на $0,3^\circ\text{C}$ и постоянное атмосферное увлажнение; III – постоянная температура воздуха и увеличение атмосферных осадков на 14 мм/год ; IV – уменьшение температуры воздуха на $0,3^\circ\text{C}$ и увеличение атмосферного увлажнения на 14 мм/год ; V – уменьшение средней температуры воздуха на $0,3^\circ\text{C}$ и атмосферных осадков на 14 мм/год .

По результатам расчётов сделан вывод о том, что, во-первых, увеличение подземного стока будет происходить при первом, третьем и четвёртом сценариях изменений климата, причём как при

потеплении, так и при похолодании. Основным условием увеличения подземного стока является рост атмосферного увлажнения, в том числе и за тёплый период. Во-вторых, уменьшение подземного стока вероятно не только при похолодании и аридизации, но и при потеплении, если атмосферное увлажнение существенно не изменится, но возрастёт испарение. В-третьих, доля подземной составляющей в суммарном стоке возрастает только при сценарии одновременного уменьшения температуры воздуха и атмосферных осадков, а при остальных сценариях падает или за счёт общего снижения стока, или вследствие более быстрого роста поверхностной составляющей (табл. 3).

Указанные выше выводы получены без учёта изменений лесистости и заболоченности водосборов, нелинейно связанных с атмосферным увлажнением. В частности, ранее в [3] было показано, что параметр μ в уравнениях (10, 12), характеризующий суммарное влияние физико-географиче-

Таблица 3. Вероятные изменения испарения (E_a), суммарного (Y_a) и подземного (Y_{gr}) стока реки Чузик при различных сценариях изменения температуры атмосферного воздуха (T_a) и атмосферного увлажнения (H_a)

Table 3. Possible changes of evaporation (E_a), total (Y_a) and underground (Y_{gr}) runoff of the Chuzik river under different scenarios of air temperature (T_a) and atmospheric moisture (H_a) changes

Сценарии изменения Scenarios of changes		Вероятные изменения Possible changes				
Вариант Variant	$T_a, ^\circ\text{C}$	H_a	E_a	Y_a	Y_{gr}	$Y_{gr}/Y_a, \%$
		мм/год/мм/year				
I	-2,4	522	370	152	34	22,6
	-2,1	536	379	157	35	22,2
	-1,8	550	389	161	35	21,8
	-1,5	564	398	166	36	21,4
	-1,2	578	407	171	36	21,1
	-0,9	592	417	175	36	20,8
	-0,6	606	426	180	37	20,4
	-0,3	620	435	185	37	20,1
	0,0	634	445	189	38	19,8
	0,3	648	454	194	38	19,5
	0,6	662	463	199	38	19,3
	0,9	676	473	203	39	19,0
II	-2,4	578	388	190	41	21,4
	-2,1		393	185	39	21,3
	-1,8		398	180	38	21,2
	-1,5		403	175	37	21,2
	-1,2		407	171	36	21,1
	-0,9		412	166	35	21,0
	-0,6		416	162	34	21,0
	-0,3		420	158	33	20,9
	0,0		425	153	32	20,8
	0,3		429	149	31	20,7
	0,6		432	146	30	20,7
	0,9		436	142	29	20,6

Сценарии изменения Scenarios of changes		Вероятные изменения Possible changes				
Вариант Variant	$T_a, ^\circ\text{C}$	H_a	E_a	Y_a	Y_{gr}	$Y_{gr}/Y_a, \%$
		мм/год/мм/year				
III	-1,2	522	387	135	30	22,2
		536	392	144	32	21,9
		550	397	153	33	21,7
		564	402	162	35	21,4
		578	407	171	36	21,1
		592	412	180	37	20,8
		606	417	189	39	20,6
		620	421	199	40	20,3
		634	425	209	42	20,1
		648	430	218	43	19,8
		662	434	228	45	19,6
		676	438	238	46	19,3
IV	0,9	522	412	110	24	21,6
	0,6	536	415	121	26	21,5
	0,3	550	417	133	28	21,3
	0,0	564	419	145	31	21,1
	-0,3	578	420	158	33	20,9
	-0,6	592	421	171	35	20,7
	-0,9	606	421	185	38	20,5
	-1,2	620	421	199	40	20,3
	-1,5	634	420	214	43	20,1
	-1,8	648	419	229	46	19,9
	-2,1	662	417	245	48	19,7
	-2,4	676	415	261	51	19,5
V	0,9	676	473	203	39	19,0
	0,6	662	463	199	38	19,3
	0,3	648	454	194	38	19,5
	0,0	634	445	189	38	19,8
	-0,3	620	435	185	37	20,1
	-0,6	606	426	180	37	20,4
	-0,9	592	417	175	36	20,8
	-1,2	578	407	171	36	21,1
	-1,5	564	398	166	36	21,4
	-1,8	550	389	161	35	21,8
	-2,1	536	379	157	35	22,2
	-2,4	522	370	152	34	22,6

ских условий на сток, уменьшается по мере роста атмосферного увлажнения в интервале до 600 мм/год, резко увеличивается в диапазоне от 600 до 750 и менее интенсивно – в диапазоне свыше 750 мм/год. Нелинейные связи отмечены и в случае температуры атмосферного воздуха. Так, в [25] для Западно-Сибирской равнины установлено, что значимое торфообразование начинается при среднегодовой температуре выше минус 7 °С (при температурах воздуха около минус 7 °С и ниже торфяная залежь не формируется, но возможно её сохранение за счёт торфообразования в более тёплый предыдущий период) и достигает максимальных значений при постоянной температуре воздуха около минус 3 °С. В общем случае для исследуемых рек зависимость подземного стока от параметра μ приведена на рис. 5.

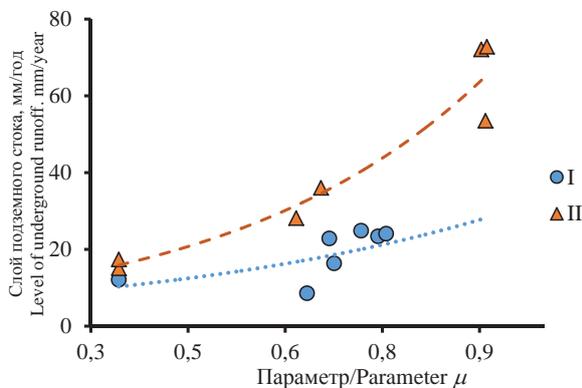


Рис. 5. Зависимость подземного стока рек Чузик (I) и Турухан (II) от параметра μ (12), характеризующего суммарное влияние рельефа, лесистости и заболоченности; уравнения связи для: р. Чузик – $Y_{gr}=5,595\exp(1,777\mu)$, $R^2=0,37$; р. Турухан – $Y_{gr}=6,765\exp(2,490\mu)$, $R^2=0,96$

Fig. 5. Ratio of groundwater flow of Chuzik (I) and Turukhan (II) rivers on the parameter μ (12), characterizing the total influence of the relief, forest cover and wetlands; Chuzik river – $Y_{gr}=5,595\exp(1,777\mu)$, $R^2=0,37$; Turukhan river – $Y_{gr}=6,765\exp(2,490\mu)$, $R^2=0,96$

Параметр μ уменьшается при росте заболоченности водосбора и возрастает при увеличении лесистости (12). Соответственно, при дальнейшем заболочивании Западно-Сибирской равнины даже при увеличении атмосферного увлажнения подземный сток либо существенно не изменится, либо будет увеличиваться с меньшей скоростью, чем суммарный сток. Болотные экосистемы на определённом этапе развития способны расширяться и при статистически неизменных атмосферных осадках, что, например, наблюдается в настоящее время в восточной части Васюганского болота на границе лесостепи и южной тайги. В таких случаях (при одновременном росте заболоченности и постоянном атмосферном увлажнении) возможно и определённое снижение подземного стока.

Заключение

Выявлена зависимость годового подземного стока от суммы атмосферных осадков за тёплый период и коэффициента суммарного стока. На основе этой зависимости предложена методика реконструкции подземного стока и собственно его реконструкция на двух типовых участках – водосборах рек Чузик в южно-таёжной подзоне Западной Сибири (элемент системы Чузик–Парабель–Обь) и Турухан на границе северной тайги и лесотундры (элемент системы Турухан–Енисей). Анализ полученных результатов, а также математического моделирования изменений водного баланса по пяти сценариям изменения температуры воздуха и атмосферных осадков показал, что, во-первых, в последние десятилетия наблюдаются наибольшие для голоцена (или близкие к наибольшим) значения подземного стока: 73 мм/год в водосборе реки Турухан; 24 мм/год в водосборе реки Чузик (максимум – 25 мм/год полторы тысячи лет до нашей эры). Минимальное значение годового подземного стока в северо-восточной части Западной Сибири (15–17 мм/год) наблюдалось примерно 10–11 тыс. лет назад, а в южной части современной таёжной зоны (9 мм/год) – примерно 8,5 тыс. лет назад.

Во-вторых, увеличение подземного стока (его абсолютных значений) возможно при росте атмосферного увлажнения как при потеплении, так и при похолодании. Важное значение в таких случаях играет заболоченность и лесистость водосбора: а) рост первого фактора способствует снижению подземного стока, а второго – увеличению; б) рост заболоченности нелинейно зависит от температуры атмосферного воздуха (оптимальный прирост торфяной залежи – примерно при минус 3 °С, при температуре ниже минус 7 °С вероятно в основном только сохранение торфа, образовавшегося при более благоприятных условиях).

В-третьих, вследствие разной чувствительности подземной и поверхностной составляющих суммарного стока к физико-географическим и геологическим условиям доля подземного стока (то есть его относительное значение) наиболее вероятно при сочетании похолодания и уменьшения атмосферных осадков. В-четвёртых, изменения подземного стока на территории Западной Сибири происходят несинхронно вследствие различных условий формирования водного стока, лесных и болотных экосистем. Общая закономерность изменения подземного стока, скорее всего, может быть выявлена только в пределах природной зоны или подзоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (проект № 14.Z50.31.0012), Томского политехнического университета (проект ВИУ_VAF_144_2014), РФФ 17–17–01127.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейштадт М.И. Болота Обь-Иртышского междуречья // Природные условия освоения междуречья Обь-Иртыш / под ред. М.И. Нейштадта, Г.Д. Рихтера. – М.: Институт географии АН СССР, 1972. – С. 322–346.
2. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasuygan Mire, Western Siberia, Russia // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – № 1. – P. 3–15. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
3. Савичев О.Г., Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири в голоцене // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 87–96.
4. Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // *Геоэкология*. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
5. Состояние геологической среды (недр) на территории Томской области в 2014 г. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», 2015. – Вып. 20. – 84 с.
6. Состояние геологической среды (недр) на территории Томской области в 2015 г. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», 2016. – Вып. 21. – 80 с.
7. Савичев О.Г. Подземная составляющая стока рек бассейна Средней Оби // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2010. – № 1. – С. 36–39.
8. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier et al. // *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences* / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – P. 111–154.
9. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1960. – 343 с.
10. Кусковский В.С. Гидрогеологические условия формирования подземного стока рек Горного Алтая: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1966. – 23 с.
11. Попов О.В. Подземное питание рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 291 с.
12. Hendriks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – Oxford; New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
13. Гриневский С.О. Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод на основе гидрогеологических моделей: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Москва, 2012. – 44 с.
14. Боровский Б.В., Марков М.Л. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? // *Разведка и охрана недр*. – 2014. – № 5. – С. 10–16.
15. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches / M.P. Miller, H.M. Johnson, D.D. Susong, D.M. Wolock // *Journal of Hydrology*. – 2015. – V. 522. – P. 203–210.
16. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records // *Journal of Hydrology*. – 2015. – V. 523. – P. 636–649.
17. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. – 1970. – V 10. – № 3. – P. 282–290.
18. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.
19. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 718 с.
20. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 17. Тюменская и Омская области. – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – 702 с.
21. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. – М.: Госстрой, ГУП ЦПП, 2003. – 162 с.
22. Climate changes in Siberia / P.Ya. Groisman, T.A. Blyakharchuk, A.V. Chernokulsky et al. // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences* / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – Ch. 3. – P. 57–110.
23. Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change // *Global and Planetary Change*. – 2015. – V. 128. – P. 14–23.
24. The Taimyr Peninsula and the Severnaya Zemlya archipelago, Arctic Russia: a synthesis of glacial history and palaeo-environmental change during the Last Glacial cycle (MIS 5ee2) / P. Moller, H. Alexanderson, S. Funder, C. Hjort // *Quaternary Science Reviews*. – 2015. – V. 107. – P. 149–181.
25. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. The nonlinear effects based on peat chronology data in paleoclimatic reconstructions // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43. – P. 1–5.

Поступила 17.01.2016 г.

Информация об авторах

Моисеева Ю.А., инженер Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.42:57.4

METHOD OF CALCULATION AND POTENTIAL CHANGES IN GROUNDWATER FLOW IN WESTERN SIBERIA IN HOLOCENE

Yulia A. Moiseeva¹,
julchiky@mail.ru

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research. Knowledge of paleohydrogeological conditions is the important factor in solving the problems of groundwater resources assessment, mineral exploration, engineering domestic and industrial wastes landfill and prerequisite for development of long-term predicting methods of environmental changes.

The aim of research is to develop and substantiate the methods of paleohydrogeological reconstructions of underground water flow and to identify long-term changes of groundwater flow in Western Siberia and the factors that determine them.

Methods: geographical and hydrological and statistical methods, mathematical modeling of hydrological and hydrogeological processes.

Results and conclusions. The authors have proposed the technique of groundwater runoff paleohydrogeological reconstructions and determined the relationship between the annual underground runoff from amount of precipitation for the warm period and the coefficient of the total flow. Based on this relationship they developed the method of the underground runoff reconstruction and tested it by the example of watersheds of the rivers Chuzik (South taiga subzone, the element of the Ob river synodic) and Turukhan (border of northern taiga and forest tundra, tributary of the Yenisei). It was shown that the increase in groundwater runoff is possible at growth of atmospheric precipitation and climatic cooling. Decrease groundwater runoff is determined by the reduction in atmospheric moistening and growth of waterlogging.

Key words:

Groundwater runoff, paleohydrogeological reconstructions, mathematical modeling, Western Siberia, atmospheric moistening.

The research was financially supported by the Government of the Russian Federation (project no. 14.Z50.31.0012), Tomsk Polytechnic University (project БУУ_VAF_144_2014), Russian Scientific Fund 17–17–01127.

REFERENCES

1. Neyshtadt M.I. Bolota Ob-Irtyshskogo mezhdurechya [Bogs of the Ob-Irtysh interfluvial]. *Prirodnye usloviya osvoeniya mezhdurechya Ob-Irtysh* [Natural conditions of the development interfluvies Ob and Irtysh]. Ed. by M.I. Neyshtadt, G.D. Rikhter. Moscow, Institute of Geography AN SSSR Press, 1972. pp. 322–346.
2. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2015, no. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
3. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. Methods of reconstruction of a zonal runoff in Western Siberia in Holocene. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no 5, pp. 87–96. In Rus.
4. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in average seasonal and annual mean levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in Tomsk Region. *Geoecologiya*, 2010, no 1, pp. 23–29. In Rus.
5. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Tomskoy oblasti v 2014 g.* [State of geological environment (subsurface) in Tomsk region in 2014]. Tomsk, Tomskgeomonitoring Publ., 2015. Iss. 20, 84 p.
6. *Sostoyaniye geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Tomskoy oblasti v 2015 g.* [State of geological environment (subsurface) in Tomsk region in 2014]. Tomsk, Tomskgeomonitoring Publ., 2016. Iss. 21, 80 p.
7. Savichev O.G. Subsurface runoff in Middle Ob' watershed. *Melioratsiya i vodnoye hozyajstvo*, 2010, no 1, pp. 36–39. In Rus.
8. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. Ch. 4, pp. 111–154.
9. Kudelin B.I. *Printsipy regionalnoy otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles of regional assessment of natural resources of groundwater]. Moscow, MGU Press, 1960. 343 p.
10. Kuskovsky V.S. *Gidrogeologicheskie usloviya formirovaniya podzemnogo stoka rek Gornogo Altaya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Hydro-geological conditions of formation of groundwater flow of Gorny Altai rivers. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1966. 23 p.
11. Popov O.V. *Podzemnoe pitaniye rek* [Groundwater nourishment of rivers]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968. 291 p.
12. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
13. Grinevskiy S.O. *Otsenka infiltratsionnogo pitaniya i resursov podzemnykh vod na osnove gidrogeologicheskikh modeley*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Assessment of infiltration recharge and groundwater resources, based on the hydrogeological models. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2012. 44 p.
14. Borevskiy B.V., Markov M.L. Is river low-water flow a measure contributing to underground water or common underground water inflow? *Prospect and protection of mineral resources*, 2014, no. 5, pp. 10–16. In Rus.
15. Miller M.P., Johnson H.M., Susong D.D., Wolock D.M. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 522, pp. 203–210.
16. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 523, pp. 636–649.

17. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10 no. 3, pp. 282–290.
18. Kritskiy S.N., Menkel M.F. *Gidrologicheskie osnovy upravleniya vodokhozyaystvennymi sistemami* [Hydrological foundations of water system management]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 271 p.
19. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1–6. Vyp. 20. Tomskaya, Novosibirskaya, Kemerovskaya oblasti, Altaysky kray* [Scientific and Applied Climate Handbook. Series 3. Long-term data. P. 1–6. Vol. 20. Tomsk, Novosibirsk, Kemerovo Regions, Altai Territory]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 718 p.
20. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1–6. Vyp. 17. Tyumenskay i Omskaya oblasti* [Scientific and Applied USSR Climate Reference Book. Series. 3. Long-term data. P. 1–6. Vol. 17. Tyumen and Omsk regions]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1998. 702 p.
21. *Stroitel'naya klimatologiya. SNiP 23–01–99** [Building Climatology. SNiP 23–01–99*]. Moscow, Gosstroy GUP CPP, 2003. 162 p.
22. Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V. Climate changes in Siberia. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. Ch. 3, pp. 57–110.
23. Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change. *Global and Planetary Change*, 2015, vol. 128, pp. 14–23.
24. Moller P., Alexanderson H., Funder S., Hjort C. The Taimyr Peninsula and the Severnaya Zemlya archipelago, Arctic Russia: a synthesis of glacial history and palaeo-environmental change during the Last Glacial cycle (MIS 5e2). *Quaternary Science Reviews*, 2015, vol. 107, pp. 149–181.
25. Savichev O.G., Reshetko M.V., Moiseeva Yu.A. The nonlinear effects based on peat chronology data in paleoclimatic reconstructions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, pp. 1–5.

Received: 17 January 2017.

Information about the authors

Yulia A. Moiseeva, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.