
**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ
И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 556.3

**УСЛОВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
ВЕРХНЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗОНЫ НА ТЕРРИТОРИИ
ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

© 2018 г. О. Г. Савичев^{1,*}, В. А. Льготин^{2,**}, Ю. А. Моисеева^{1,***}

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов,
пр. Ленина, 30, Томск, 634050 Россия*

² *ФГБУ “Гидроспецеология”, филиал “Сибирский региональный центр ГМСН”,
ул. Никитина, 99, Томск, 634061 Россия*

* E-mail: OSavichev@mail.ru

** E-mail: mail@sfo.geomonitoring.ru

*** E-mail: jamoiseeva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2018 г.

После исправления 30.05.2018 г.

Изучение режима подземных вод является ключевым фактором решения научных и инженерных задач — от долгосрочного прогноза изменений климата и окружающей среды до обеспечения населения питьевой водой. Это определяет актуальность соответствующих исследований, особенно на территории Западной Сибири — одного из важнейших нефтегазодобывающих регионов Евразии. Анализ материалов многолетних гидрогеологических наблюдений на территории Томской области, расположенной в пределах таежной зоны Западной Сибири, показал, что после 1994 г. (по сравнению с периодом со второй половины 1960-х гг. до 1994 г. включительно) произошел подъем уровней подземных вод четвертичных и палеогеновых отложений в среднем на 0.31 м. Разработана математическая модель внутригодового распределения стока рек Тым, Кеть, Васюган, Чая (притоки Оби). Показано, что после 1994 г. произошло уменьшение льдистости почвогрунтов в конце зимнего периода, увеличение их влажности в апреле-мае, увеличение водоотдачи из снежного покрова и дождей в апреле. В условиях избыточного увлажнения это приводит к опережающему увеличению влагозапасов водосборов относительно роста подземного стока и, как следствие, повышению уровней подземных вод.

Ключевые слова: *уровень подземных вод, верхняя гидродинамическая зона, водный баланс, изменения климата, Западная Сибирь, Томская область*

DOI: 10.1134/S0869780318060054

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия на территории Северной Евразии выявлены заметные изменения климата и ряда характеристик состояния поверхностных и водных объектов [5, 22, 28]. В результате анализа данных гидрогеологических наблюдений за период с середины и конца 1960-х (начала наблюдений) до 2005 г. выявлено статистически значимое увеличение среднегодовых уровней и температуры ненарушенных хозяйственной деятельностью подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области (Западная Сибирь), полученных на восемь режимных скважинах государственной наблюдательной сети в селах Напас, Средний Васюган, Подгорное, Пудино, Белый Яр, Зырянское, Мельниково. По всем изученным скважинам было отмечено нарушение однородности рядов, в

большинстве случаев связанное с увеличением уровней и температуры вод четвертичных и палеогеновых отложений в среднем на 0.21 м и 0.22°C, соответственно [12].

За последующие годы был накоплен материал, свидетельствующий о продолжающемся увеличении меженного речного стока, температуры приземных слоев атмосферного воздуха и речных вод в бассейне Северного ледовитого океана [6, 7, 11]. С учетом этого требуется уточнение информации о тенденциях изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны в пределах таежной зоны Западной Сибири, а также более детальное объяснение причин этих изменений на основе математического моделирования элементов водного баланса речных водосборов на участке среднего течения Оби.

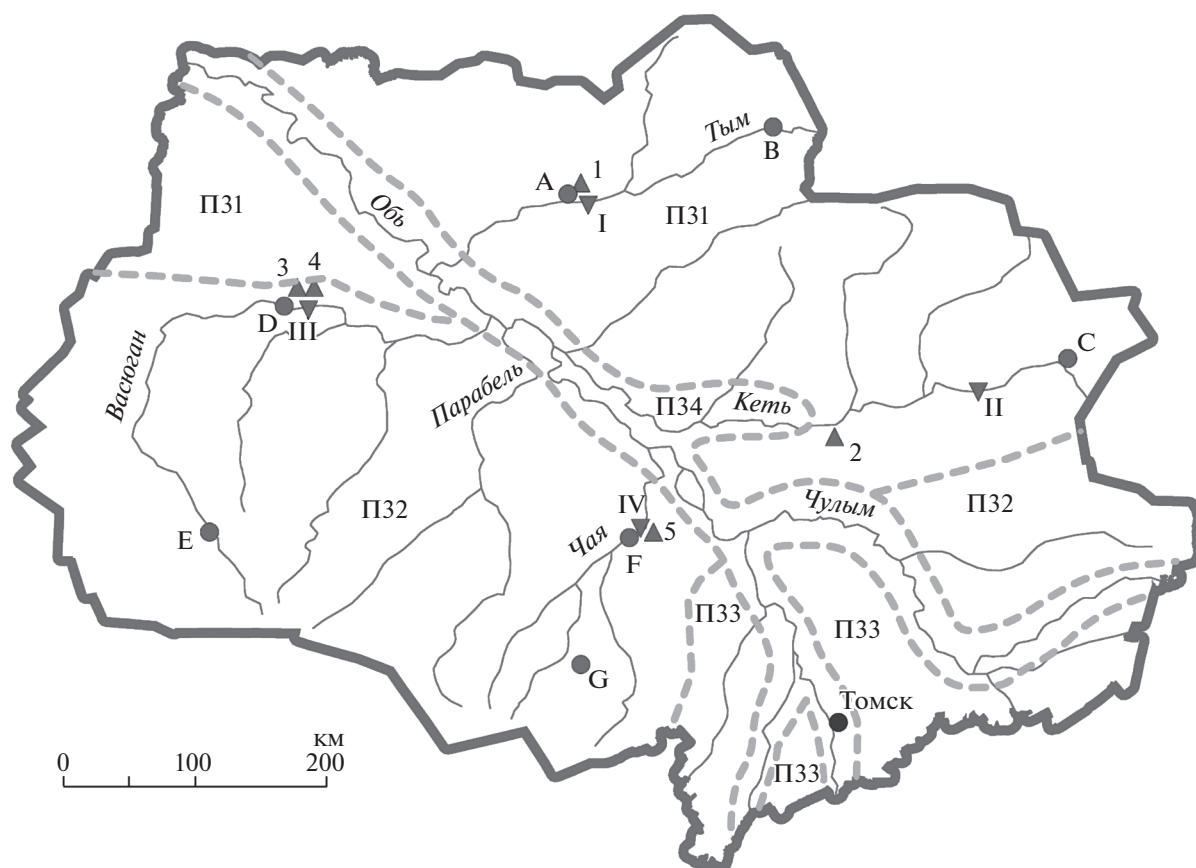


Рис. 1. Схема размещения пунктов гидрогеологических (1–5), гидрологических (I–IV) и метеорологических (A–G) наблюдений (табл. 1); пунктиром выделены подзоны лесно-болотной зоны согласно [9]: ПЗ1 – подзона кедрово-болотная (среднетаежная) средней продуктивности и высокой активности болотообразования; ПЗ2 – подзона урманно-болотная (южнотаежная) высокой продуктивности и активности болотообразования; ПЗ3 – подзона подтайги (лиственно-лесная) высокой продуктивности и активности биологического круговорота; ПЗ4 – пойменная внезональная территория луговых сообществ с высокой пространственной и временной изменчивостью продуктивности.

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной объект исследования – подземные воды верхнего гидрогеологического этажа Западно-Сибирского артезианского бассейна, приуроченные к водоносным отложениям четвертичного (скв. 113р, 169р, 94р) и палеогенового (скв. 157р, 167р) возраста и широко распространенные в Томской области. Выбор пунктов наблюдений осуществлялся с учетом: 1) отсутствия явно выраженного антропогенного воздействия на подземные воды и продолжительности рядов за уровнями; 2) размещения скважин в водосборах средних рек – притоков Оби, на которых проводятся режимные гидрологические и метеорологические наблюдения. Расположение пунктов показано на рис. 1, краткое описание пунктов гидрогеологических и гидрологических наблюдений – в табл. 1. Исходной гидрогеологической информацией для проведения исследований послужили данные, полученные с середины 1960-х гг. по 1995 г. Том-

ской геолого-разведочной экспедицией, а с 1996 по 2015 г. специалистами АО “Томскгеомониторинг” [12, 23, 24].

Исследование включало: 1) статистический анализ (проверка на однородность по критериям Стьюдента и Фишера, проверка на случайность по критерию Питмена) удлиненных (до 2010–2015 гг.) рядов среднегодовых и среднемесячных уровней подземных вод по методике, приведенной в [12]; 2) разработку и апробацию математической модели внутригодового распределения суммарного водного стока речных водосборов и их подземной составляющей; 3) сопоставление результатов статистического анализа уровней подземных вод и моделирования среднемесячных расходов воды за условно однородные периоды. Уровень значимости принят в размере 5%. В виде критерия качества модели использовался показатель NS отношения суммы квадратов разностей вычисленных и измеренных значений к дисперсии согласно [27].

Таблица 1. Пункты гидрогеологических и гидрологических наблюдений

Информация о пунктах гидрогеологических наблюдений					Информация о пунктах гидрологических наблюдений [18]				
Номер на рис. 1	Населенный пункт	Номер скважины	Возраст водоносных комплексов, тип режима	Период наблюдений	Номер на рис. 1	Река – пункт	Площадь водосбора F , км ²	Лесистость водосбора $f_{лр}$, %	Заболоченность водосбора $f_{зб}$, %
1	с. Напас	157р	Φ_{1rg} , напорные воды весенне-осеннего питания	1970–2010	I	р. Тым, с. Напас	24500	70	25
2	с. Белый Яр	113р	N_1 , напорные воды весенне-осеннего питания	1968–2012	II	р. Кеть, п. Максимкин Яр	38400	80	10
3	с. Средний Васюган	167р	Φ_{2tv} , напорные воды весенне-осеннего питания	1972–2015	III	р. Васюган, с. Средний Васюган	31700	58	40
4		169р	aQ_{11tb} , грунтовые воды весенне-осеннего питания	1972–2010					
5	с. Подгорное	94р	N_1 , грунтовые воды весенне-осеннего питания	1965–2015	IV	р. Чая, с. Подгорное	25000	60	35

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее выполненные исследования уровней подземных вод на территории Томской обл. за период с начала наблюдений до 2005 г. позволили выявить повышение уровней подземных вод с середины 1980-х гг. по 2005 г. (по сравнению с предыдущим периодом) в среднем на 0.21 м. Наибольшее увеличение отмечено в зимний период (в среднем на 0.23 м), наименьшее – в летне-осенний (0.09 м). Кроме того, было выявлено неслучайное увеличение среднегодовых и среднесезонных уровней подземных вод (за весь период наблюдений) у сел Подгорное (скв. 94р) и Напас (скв. 157р) [12, 28]. Согласно [20], с 1980 г. по 2003 г. среднемесячные уровни подземных вод зоны активного водообмена вне участков явного антропогенного влияния повысились по сравнению с периодом 1960–1970 гг. в среднем на 0.1–0.4%, причем наиболее устойчивый рост характерен для зимнего сезона и начала весеннего половодья, пик которого на рассматриваемой территории приходится на конец мая-июнь.

Анализ данных наблюдений за периоды 1965–1973 гг. и 2010–2015 гг. в целом подтвердил указанные выше выводы. В частности, отмечен дальнейший подъем уровней подземных вод в среднем на 0.34 м. Нарушение однородности рядов среднегодовых значений уровней подземных вод зафиксировано в водосборах рек Тым, Васюган, Чая, Кеть (табл. 2) Неслучайное изменение сред-

негодовых уровней подземных вод за весь период наблюдений выявлено на скважинах 157р, 167р, 94р, что позволило выделить с начала 1970-х гг. два условно однородных периода – до 1994 г (включительно) и после (табл. 3).

Изменения среднемесячных уровней подземных вод за эти периоды распределено неодинаково для разных рек и гидрологических сезонов (рис. 2). Так, для скважин в водосборах рек Тым и Чая отмечено их увеличение в январе-феврале и июне, хотя у с. Подгорное увеличение уровней подземных вод в зимнюю межень более выражено. В прочих случаях внутригодовое распределение приращений уровней подземных вод более равномерное.

Для объяснения выявленных изменений уровней подземных вод была разработана модель месячного водного стока при следующих допущениях:

1) изменение влагозапасов речного водосбора W_U пропорционально изменению водного стока V_U и времени добегания τ водных масс по водосбору за период dt (ф. 1);

2) характеристики процессов формирования суммарного и подземного водного стока в среднем постоянны для водосборов средних рек с учетом выявленных в [8, 10, 13, 17, 21, 23, 24] закономерностей изменения гидроклиматических условий и состояния почвогрунтов, а также так-

Таблица 2. Результаты проверки рядов среднегодовых значений уровней подземных вод

№ (рис. 1)	Скважина (возраст отложений)	Период	A , м	σ , м	$S/S_{5\%}$	$F/F_{5\%}$	$\pi/\pi_{5\%}$	k_1 , м/год
1	157р (Р ₁)	1971–1994	76.83	0.08	–	–	0.99	–
		1995–2010	76.98	0.06	–	–	0.14	–
		1971–2010	76.89	0.10	3.19	0.63	3.01	0.007
2	113р (N ₁)	1968–1994	76.38	0.34	–	–	–0.89	–
		1995–2012	76.64	0.36	–	–	0.67	–
		1968–2012	76.48	0.37	1.19	0.47	0.66	–
3	167р (Р ₂)	1972–1994	60.77	0.21	–	–	1.29	0.017
		1995–2015	61.07	0.13	–	–	0.58	–
		1972–2015	60.92	0.23	2.76	1.07	3.14	0.013
4	169р (aQ _{II})	1972–1994	59.95	0.25	–	–	–0.85	–
		1995–2010	60.08	0.40	–	–	–0.74	–
		1972–2010	60.01	0.33	0.63	0.88	–0.06	–
5	94р (N ₁)	1965–1994	64.17	0.61	–	–	1.02	0.029
		1995–2015	64.86	0.40	–	–	1.22	0.036
		1965–2015	64.45	0.63	2.24	1.00	2.69	0.028

Примечание: A и σ – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение уровней подземных вод; S и $S_{5\%}$, F и $F_{5\%}$, π и $\pi_{5\%}$ – фактическое и критическое значения критерия Стьюдента, Фишера и Питмена, соответственно; k_1 – коэффициент регрессии в уравнении $Y = k_1 t + k_2$, где Y – исследуемая величина; t – год. Полу жирным шрифтом выделены соотношения фактических и критических значений критериев, которые свидетельствуют о возможном нарушении однородности и случайности выборки при уровне значимости 5%

Таблица 3. Средние месячные уровни подземных вод на территории Томской обл. за однородные периоды, м (в Балтийской системе высот)

Скважина	Период	Месяц календарного года											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
157р	1971–1994	76.67	76.70	76.81	76.99	77.28	77.10	76.79	76.73	76.70	76.75	76.79	76.78
	1995–2015	76.84	76.87	76.97	77.04	77.44	77.38	76.93	76.88	76.91	76.91	76.92	76.88
113р	1968–1994	76.35	76.19	76.13	76.12	76.30	76.63	76.67	76.59	76.48	76.42	76.37	76.34
	1995–2012	76.62	76.53	76.44	76.46	76.66	76.92	76.98	76.88	76.80	76.71	76.63	76.56
167р	1972–1994	60.53	60.58	60.57	60.63	61.31	61.34	60.54	60.43	60.36	60.43	60.52	60.52
	1995–2015	60.91	60.92	60.96	61.05	61.78	61.74	61.04	60.78	60.83	60.87	60.93	60.92
169р	1972–1994	59.84	59.75	59.64	59.57	60.02	60.34	60.18	60.10	60.05	60.06	60.02	59.98
	1995–2012	60.00	59.87	59.76	59.74	60.10	60.41	60.33	60.19	60.16	60.18	60.17	60.08
94р	1965–1994	63.83	63.80	63.79	63.89	64.67	65.11	64.77	64.42	64.18	64.00	63.99	63.93
	1995–2015	64.61	64.55	64.42	64.54	65.47	65.89	65.37	64.98	64.77	64.67	64.70	64.65

сономических элементов схемы природно-ресурсного районирования Томской обл. [9], в частности приуроченности водосборов рек Тым и Кеть к подзонам кедрово-болотной (среднетаежной) средней продуктивности и высокой активности болотообразования, водосборов рек Васюган и Чая – к урманно-болотной (южнотаежной)

высокой продуктивности и активности болотообразования;

3) примерного соответствия поверхностного и подземного водосборов с учетом систематической ошибки в определении подземного перетока с юга и юго-запада на север и северо-восток при допущении близости условий формирования

подземного стока в пределах рассматриваемых природных зон и подзон [9];

4) изменение площади водосбора F (поверхностной и подземной) незначительно, и им можно пренебречь (ф. 2);

5) скорость добегания β водных масс пропорциональна скорости движения подземных вод, которая, в свою очередь, пропорциональна коэффициенту фильтрации в насыщенной зоне k_0 , влажности почвы ω за вычетом ее льдистости ε , а также средневзвешенному уклону реки J и длине реки L , либо амплитуде высот $(Z_{max} - Z_{wla})$ и площади водосбора F (ф. 3);

6) изменение скорости добегания водных масс по водосбору пропорционально коэффициенту подземного стока (отношению слоя подземного (Y_{gr}) и суммарного (Y) стока (ф. 4);

7) увлажнение водосбора H происходит за счет жидких атмосферных осадков H_p , выпадающих при положительной температуре атмосферного воздуха T_a , и водоотдачи из снежного покрова H_{sm} (ф. 5);

8) неявная разностная схема для уравнения (ф. 2) имеет вид (ф. 6);

$$V_U = V_H - V_E - V_Y = \frac{dW_U}{dt} \approx \tau \frac{dV_Y}{dt} + V_Y \frac{d\tau}{dt}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_Y}{dt} &= \frac{d(FYa)}{dt} \approx aF \frac{dY}{dt} = \\ &= \frac{1}{\tau} \left(H - E - Y \left(1 + \frac{d\tau}{dt} \right) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1}{\tau} \approx \frac{k_{f,0}(\omega - \varepsilon)^b J}{L} \approx \frac{k_{f,1}(\omega - \varepsilon)^b (Z_{max} - Z_{wla})}{F}, \quad (3)$$

$$Y \frac{d\tau}{dt} \approx k_3 Y_{gr}, \quad (4)$$

$$H = H_r + H_{sm}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Y_{t+1} = Y_t \frac{1 - 0.5\Delta t\beta_t}{1 - 0.5\Delta t\beta_{t+1}} + \frac{\Delta t}{2 + \Delta t\beta_{t+1}} (\beta_{t+1}H_{t+1} + \\ + \beta_t H_t + (\beta_{t+1} + \beta_t)k_3 Y_{gr}) + \mu_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где V_H, V_E, V_Y, V_U – объем увлажнения, испарения, суммарного (поверхностного и подземного) стока и изменения влагозапасов в водосборе за период времени dt ; H, E, Y – слой увлажнения, испарения и суммарного стока за тот же период; a – коэффициент размерности; Δt – шаг по времени (в рассматриваемой работе принято $\Delta t = 1$); $k_{f,1}, k_3, b$ – эмпирические коэффициенты; μ – невязка расчетной схемы с математическим ожиданием μ_0 ; Z_{max} – максимальная отметка поверхности водосбора; Z_{wla} – средний уровень речных вод в расчетном створе. Значения $k_{f,1}, k_3, b, \mu_0$ определяются методами оптимизации.

Изменение уровней подземных вод, м

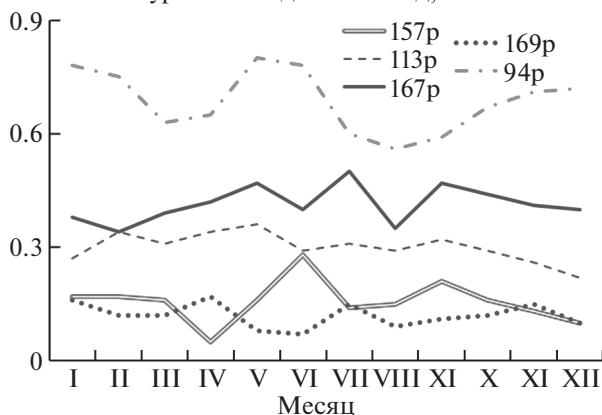


Рис. 2. Изменения среднемесячных уровней подземных вод на территории Томской обл. в среднем за период 1995–2015 гг. относительно среднемесячных значений за период с начала наблюдений до 1994 г.

Величина Y_{gr} может быть определена двумя способами:

1) по результатам наблюдений:

– в месяцы зимней межени (с декабря по март) подземный сток принимается равным суммарному;

– в остальные месяцы подземный сток определяется линейной интерполяцией между значениями подземного стока в марте и декабре;

2) по формуле (7), полученной при анализе связей между годовым подземным стоком, полученным первым способом, и суммой атмосферных осадков за теплый период $H_{T>0}$ (фактор, определяющий инфильтрацию) и коэффициентом стока Y_a/H_a (фактор, определяющий общие условия стока; Y_a и H_a – годовые значения стока и атмосферного увлажнения):

$$Y_{gr} = k_4 H_{T>0}^{k_5} \left(\frac{Y_a}{H_a} \right)^{k_6}, \quad (7)$$

где k_4, k_5, k_6 – эмпирические коэффициенты; для средних рек Томской обл. получены значения: $k_4 = 31.536$; $k_5 = 0.268 \pm 0.025$; $k_6 = 1.197 \pm 0.123$; $NS = 0.76$ [14].

Водоотдача из снежного покрова в месяц t определена по разнице влагозапасов WS за месяцы t и $(t - 1)$ с использованием коэффициентов стаивания [3, 15], данных о гидроморфологических характеристиках рек Западной Сибири [19] и распространению на территории их водосборов хвойных и лиственных лесов [9, 10].

Испарение с поверхности водосбора E_i в i -м месяце вычислено по уравнению Харгрейва с учетом рекомендаций [25]:

$$E_t = k_7 M_t R_0 (T_{a,t} + k_8) \sqrt{T_{max,t} - T_{min,t}}, \quad (8)$$

где R_0 – внеземная радиация, кДж/(см² мес); $T_{a,t}$, $T_{\max,t}$, $T_{\min,t}$ – средние, максимальные и минимальные месячные значения температуры атмосферного воздуха (°С); M_i – поправочный коэффициент (отношение расчетного значения и разности между атмосферным увлажнением и стоком); k_7 и k_8 – эмпирические коэффициенты, рассчитанные подбором (метод общего понижающего градиента в MS Excel) при условии максимального приближения к значениям среднемесячного испарения, вычисленного по методу Пенмана–Монтейта [25, 26] по данным измерений элементов теплового баланса на метеостанциях Западной Сибири. По данным для водосборов рек таежной, лесотундровой и лесостепной зон Западной Сибири получены значения $k_7 = 0.004$ и $k_8 = 30$.

Расчет влажности почвы в уравнении (3) выполнен, согласно [1], по эмпирическим формулам (9)–(11) по заданным средним значениям измеренных влагозапасов в метровом слое почвы и грунта на третью декаду мая и августа [10]:

$$\omega_t \approx \frac{\omega_{1b,t} + \omega_{1e,t}}{2000}, \quad (9)$$

$$\omega_{1e,t} = (\omega_{1b,t} + H_{r,t} + H_{sm,t}) \exp(-0.007 E_0), \quad (10)$$

$$E_{0,t} = 0.18(T_{a,t} + 25)^2(1 - f_{a,t}), \quad (11)$$

где ω_t – среднее месячное значение влажности почвы, м³/м³; $\omega_{1b,t}$ и $\omega_{1e,t}$ – влагозапасы в метровом слое почвы и грунта на начало и конец i -го месяца, мм; $E_{0,t}$ – испаряемость, мм/месяц; $f_{a,t}$ – среднемесячная относительная влажность атмосферного воздуха, в долях единицы. Расчет начинается с конца зимней межени (в Западной Сибири это – март). Начальные влагозапасы в метровом слое почвы и грунта (в конце марта) подбирались из условия минимума суммы модулей отклонений расчетных и измеренных значений.

Расчет льдистости почвы ε для месяцев с отрицательной температурой почвы выполнен подбором (метод общего понижающего градиента в MS Excel) по уравнениям (12)–(13) согласно [3]:

$$\frac{55}{12}(1 + 8\varepsilon_t)^2 \left(\frac{\theta - \varepsilon}{\theta}\right)^{\alpha-1} \left(\frac{\vartheta}{\omega_t - \frac{\rho_l}{\rho_w} \varepsilon_t}\right)^\alpha + T_{s,t} = 0, \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{2.7 - 5.2 \times 10^{-6} \omega_{fc}^{3.5}}{\lg \omega_{fc} - \lg \vartheta}, \quad (13)$$

где θ – пористость почвы; ϑ – максимальная гигроскопичность почвы; ρ_l и ρ_w – плотность льда и воды; принято $\rho_l/\rho_w \approx 0.9$; ω_{fc} – наименьшая влагоемкость почвы; $T_{s,t}$ – температура почвы на глубине 0.5 м.

Пористость почвы θ (м³/м³) и содержание глинистых частиц S_{clay} (частиц с диаметром менее 0.002 мм) приняты по [4]. Максимальная гигроскопичность ϑ определена из соотношения [2]:

$$\omega_{wp} = 1.34\vartheta, \quad (14)$$

где ω_{wp} – влажность завядания.

Наименьшая влагоемкость почвы ω_{fc} (м³/м³) и влажность завядания ω_{wp} (м³/м³) рассчитана по зависимостям:

$$\omega_{fc} = 89.0467 \times 10^{-3} S_{clay}^{0.3496}, \quad (15)$$

$$\omega_{wp} = 37.1342 \times 10^{-3} S_{clay}^{0.5}, \quad (16)$$

где содержание глинистых частиц S_{clay} в % от веса почвы (приводится по [4]). Класс почв принят с учетом данных [17].

Средняя месячная температуры почвы на глубине 0.5 м от поверхности определяется по эмпирической зависимости (ф. 17), полученной методом наименьших квадратов по данным интерполяции среднемесячных значений температуры почвы на метеостанциях Западной Сибири на глубине 0.4 и 0.8 м:

$$T_{s,t} = k_6 T_{a,t} + k_7, \quad (17)$$

где $k_6 = 0.589 \pm 0.057$; $k_7 = 5.586 \pm 0.216$; $NS = 0.80$. Подземная составляющая годового речного стока Y_{gr} определена согласно [14].

Таким образом, модель (ф. 6) представляет собой уравнение месячного водного баланса водосборного бассейна, для оценки элементов которого требуется информация о среднемесячных значениях температуры атмосферного воздуха, месячных суммах атмосферных осадков, среднемесячных значениях относительной влажности, начальных влагозапасов в конце зимней межени. Аprobация модели проведена по данным о гидрологических и климатических условиях в водосборах рек Тым, Кеть, Васюган и Чая (см. табл. 1) для двух периодов – с 1971 до 1994 г. и после 1994 г.

Значения слоя водного стока, атмосферных осадков и испарения определены для геометрических центров водосборов (от истоков рек до замыкающих створов). Для водосбора р. Тым в створе с. Напас использованы данные, полученные на метеостанции Ванжиль-Кынак (дополнительные сведения по зависимости температуры атмосферного воздуха и почвы и влажности почвогрунтов – по метеостанции Напас), для водосбора р. Кеть в створе с. Максимкин Яр – по метеостанции Усть-Озерное (дополнительные данные по влажности почвогрунтов – по метеостанции Колпашево) для водосбора р. Чая – на метеостанции Бакчар (дополнительные сведения – по метеостанции Подгорное), по водосбору р. Васюган – по метеостанции Средний Васюган (дополнительные сведения – по метеостанции

Таблица 4. Основные гидроморфологические характеристики и параметры модели (ф. 3, 6) при расчете внутри-годового распределения слоя суммарного водного стока притоков р. Обь

Параметры модели	Река-пункт			
	р. Тым – с. Напас	р. Кеть – п. Максимкин Яр	р. Васюган – с. Средний Васюган	р. Чая – с. Подгорное
Критерий Нэша – Сатклифа NS	0.96	0.27	0.51	0.63
$k_{f,1}$ в уравнении (3)	11568.569	0.93	0.74	327.362
b в уравнении (3)	2.264	505.765	695.096	0.613
Δt в уравнении (6)	1.0	1.111	0.780	1.0
k_3 в уравнении (6)	0.000	1.0	1.0	-0.456
μ_0 в уравнении (6)	-0.759	-0.428	-0.299	-0.841

Примечание: значения Z_{wla} приняты по [20], значения F, L, J, Z_b , – по [18], значения Z_{max} – по топографическим картам; остальные величины определены подбором (метод общего понижающего градиента) средствами Excel.

Майск; см. рис. 1). Параметры уравнений (ф. 3, 6) и значения критерия Нэша-Сатклифа NS приведены в табл. 4.

Анализ результатов использования модели (ф. 6) для периодов до и после 1994 г. показал, что, во-первых, ее использование позволяет удовлетворительно описать наблюдаемые изменения суммарного стока и его подземной составляющей при минимуме исходной информации. Во-вторых, специфика изменения водного режима изученных рек заключается в увеличении слоя стока изученных рек в апреле, в зимние и осенние месяцы (рис. 3).

В-третьих, повсеместно наблюдается увеличение температуры приземных слоев атмосферного воздуха в феврале-мае, в октябре и в целом за год, но статистически значимое увеличение суммы ат-

мосферных осадков за год зафиксировано не везде. Однако даже при статистически неизменном годовом атмосферном увлажнении и потеплении в начале весны возрастает суммарный сток в эти месяцы за счет увеличения суммы водоотдачи из снежного покрова и из жидких осадков. Кроме того, отмечается рост подземной составляющей стока за год в целом, что объясняется увеличением подземного стока на границах зимнего периода, некоторым уменьшением льдистости (соответственно, улучшением фильтрационных свойств) и возрастанием суммы атмосферных осадков за теплый период – одного из важных факторов инфильтрации. При этом следует отметить, что увеличение температуры почвы в зимний период в Обь-Иртышском междуречье отмечено в результате наблюдений [8], а аналогичные тенденции в изменении речного стока были отмечены и в других регионах Северной Евразии [6, 11].

В-четвертых, в течение последних десятилетий происходит увеличение ресурсов болотных и подземных вод, о чем свидетельствуют отрицательные значения k_2 и μ_0 , и что подтверждается данными о вертикальном приросте торфяной залежи со скоростью около 1 мм/год [18] и увеличении уровней подземных вод в Томской обл. [12, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение 1970–2010-х гг. отмечается увеличение уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны в таежной зоне Западной Сибири. На территории Томской обл. среднее значение их повышения за период после 1994 г. (по сравнению с периодом с начала наблюдений до 1994 г. включительно) составляет 0.31 м.

Статистический анализ климатических и гидрологических данных и моделирование внутригодового распределения стока рек Тым, Кеть, Ва-

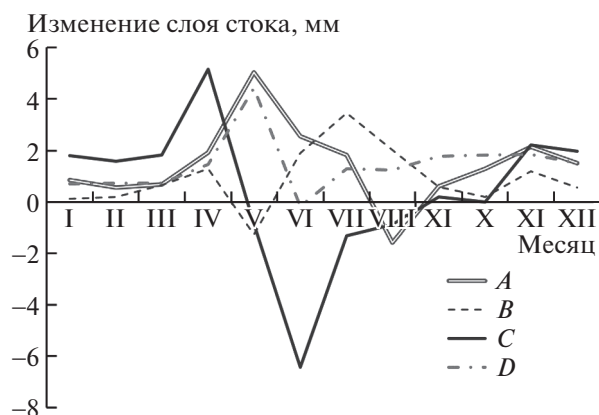


Рис. 3. Изменения среднемесячных (измеренных) значений слоя стока р. Тым у с. Напас (А), р. Кеть у п. Максимкин Яр (В), р. Васюган у с. Средний Васюган (С), р. Чая у с. Подгорное (D) в среднем за период 1995–2015 гг. относительно среднемесячных значений за период с начала наблюдений до 1994 г.

сюган, Чая (притоки р. Оби на участке ее среднего течения) показали, что за период после 1994 г. произошло уменьшение льдистости почвогрунтов в конце зимнего периода, увеличение их влажности в апреле-мае, увеличение условно жидких атмосферных осадков и водоотдачи в апреле (в водосборе р. Тым увеличивается водоотдача в мае, где снеготаяние наблюдается позже, чем в водосборах других изученных рек).

Таким образом, в последние десятилетия происходит некоторое смещение сроков наступления весеннего половодья на более ранние сроки и увеличение влажности почвогрунтов. Поскольку это происходит в условиях избыточного увлажнения (по В.С. Мезенцеву [13]), то наблюдается опережающее увеличение влагозапасов водосборов относительно роста подземного стока и, как следствие, повышение уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны в таежной зоне. Очевидно, это, в свою очередь, может вызвать дополнительное увеличение подземной составляющей речного стока в условиях нисходящего режима взаимодействия подземных и поверхностных вод.

Возможно, что, с учетом данных об обратных взаимосвязях между элементами водного баланса [16], увеличение испарения с водосбора в средне- и долгосрочной перспективе в какой-то степени будет компенсировать увеличение стока. Так, определенные тенденции увеличения расчетного испарения с водосборов рек Тым, Васюган и Чая отмечены уже в последние 20–22 года. Эти тенденции могут как усиливаться, так и ослабляться за счет эволюции болотных экосистем. До сих пор этот процесс характеризовался их олиготрофизацией. Но на отдельных территориях наблюдается увеличение площади внутриболотных озер и распространение лишайников, что может свидетельствовать о наступлении новой фазы с пока неясными последствиями.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042 и № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бэфани Н.Ф., Калинин Г.П.* Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 390 с.
2. *Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.Л., Павлова К.К.* Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 189 с.
3. *Гельфан А.Н.* Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 279 с.
4. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
5. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А.* Изменение зимнего стока рек европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 581–588.
6. *Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И., Телегина Е.А.* Внутригодовое распределение стока рек с оценкой роли зимней межени // Водные ресурсы. 2017. Т. 42. № 6. С. 581–588.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. Москва, 2017. 70 с.
8. *Дюкарев Е.А.* Прогноз глубины промерзания почвы с помощью простейшей регрессионной модели // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 387. С. 266–270.
9. *Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д., Березин А.Е., Льготин В.А., Мульдьяров Е.Я.* Природно-ресурсное районирование Томской области. Томск: Изд-во “Спектр” ИОА СО РАН, 1997. 40 с.
10. *Дюкарев А.Г., Львов Ю.А., Хмелев В.А. и др.* Природные ресурсы Томской области. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 1991. 176 с.
11. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Механизм влияния глубины промерзания почв речных бассейнов на зимний сток // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 4. С. 442–451.
12. *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.
13. *Мезенцев В.С.* Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. Омск: Омский сельскохозяйственный институт, 1982. 84 с.
14. *Моисеева Ю.А., Савичев О.Г.* Способ расчета и возможные изменения подземного стока в Западной Сибири в голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 2. С. 6–14.
15. *Мотовилов Ю.Г.* Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах I. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 3. С. 243–253.
16. *Найденов В.И.* Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004. 318 с.
17. *Непряхин Е.М.* Почвы Томской области. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1977. 437 с.
18. *Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д.* Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 174–186.
19. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай. Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 487 с.
20. *Савичев О.Г., Макушин Ю.В.* Многолетние изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории Томской области //

- Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 4. С. 60–63.
21. *Савичев О.Г.* Водные ресурсы Томской области. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. 248 с.
 22. *Сперанская Н.А.* Потенциально возможное и видимое испарение и его изменения на европейской части России за последние 50 лет (по экспериментальным данным) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 6. С. 661–672.
 23. Состояние геологической среды (недр) территории Томской области в 2014 г. Вып. 20. АО “Томскгеомониторинг”. Томск: ООО “Д-принт”, 2015. 84 с.
 24. Состояние геологической среды (недр) территории Томской области в 2015 г. Вып. 21. АО “Томскгеомониторинг”. Томск: ООО “Д-принт”, 2016. 80 с.
 25. *Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.* Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. Water Resources, Development and Management Service FAO. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 1998. 276 p.
 26. *Hendriks M.R.* Introduction to Physical Hydrology. Oxford; New York, Oxford University Press. 2010. 331 p.
 27. *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.
 28. *Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., and Smith L.G.* 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. P. 111–154.

CONDITIONS OF GROUNDWATER LEVEL VARIATION IN THE UPPER HYDRODYNAMIC ZONE IN TOMSK REGION

O. G. Savichev^{a,#}, V. A. L’gotin^{b,##}, and Yu. A. Moiseeva^{a,###}

^a National Research Tomsk Polytechnic University, pr. Lenina 30, Tomsk, 634050 Russia

^b Siberian Regional Center for State Geological Monitoring”, Gidrospeztzgeologiya branch, ul. Nikitina 99, Tomsk, 634061 Russia

[#] E-mail: OSavichev@mail.ru

^{##} E-mail: mail@sfo.geomonitring.ru

^{###} E-mail: jamoiseeva@mail.ru

Groundwater regime is a key factor to solving different scientific and engineering problems ranging from the long-term prediction of climate and environmental changes to supplying population with drinking water. This determines the continuing relevance for the study of hydrological and hydrogeological conditions, including in the taiga zone of Western Siberia, which is one of the most important oil and gas producing regions of Eurasia. The results obtained by the group of authors (Savichev, Makushin, L’gotin, Shiklomanov et al.), attested to 0.21 m average increase in groundwater levels from Quaternary and Paleogene aquifers in the Tomsk region from the mid –1960s to 2005 without any evident anthropogenic influence. Therefore, the purpose of this article is: 1) supplementing conclusions for a longer series of groundwater-level observations (up to 2015) and the assessment of current hydrogeodynamic regime; 2) identifying causes of the observed changes. As a result of the analysis of long-term hydrogeological data in the territory of the Tomsk region (Western Siberia), it was revealed that after 1994 (compared to the period from the second half of the 1960s to 1994), the groundwater levels of Quaternary and Paleogene aquifers increased by 0.31 m on average. A mathematical model of the yearly distribution of the runoff in the Tym, Ket, Vasyugan, and Chaya rivers (tributaries of the Ob’ River) was developed. It was shown that after 1994 there was a decrease in the iciness of soils in the end of winter, an increase in their humidity in April-May, and an increasing water yield from the snow and rain in April. Under the conditions of excessive moisture, this leads to an outstripping increase in catchments of storage relative to the growth of groundwater runoff and, as a result, to the groundwater level rise.

Key words: groundwater level rise, upper hydrodynamic zone, water balance, climate change, Western Siberia, Tomsk region

REFERENCES

1. Befani, N.F., Kalinin, G.P. *Uprazhneniya i metodicheskie razrabotki po gidrologicheskim prognozam* [Exercises and methodological development on hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, 390 p. (in Russian)
2. Vershinina, L.K., Krestovskii, O.I., Kalyuzhnyi, I.L., Pavlova, K.K., *Otsenka poter’ talykh vod i prognozy ob’ema stoka polovod’ya* [Assessment of meltwater losses and forecasts of flood runoff]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 189 p. (in Russian)
3. Gelfan, A.N. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka* [Dynamic-stochastic modeling of the melt flow formation]. Moscow, Nauka Publ., 2007, 279 p. (in Russian)
4. Gusev, E.M., Nasonova, O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sush’i s atmosferoi* [Modeling of heat and moisture exchange of the land surface with

- the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010, 327 p. (in Russian)
5. Dzhamalov, R.G., Frolova, N.L., Telegina, E.A. *Izmenenie zimnego stoka rek evropeiskoi chasti Rossii* [Change in the winter river runoff of the European part of Russia]. *Vodnye resursy*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 581–588. (in Russian)
 6. Dzhamalov, R.G., Safronova, T.I., Telegina, E.A. *Vnutrigodovoe raspredelenie stoka rek s otsenkoi roli zimnei mezheni* [Intra-annual distribution of river runoff with the assessment of the role of winter low-water period]. *Vodnye resursy*, 2017, vol. 42, no 6, pp. 581–588. (in Russian)
 7. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2016 god* [Report on the peculiarities of climate in the territory of the Russian Federation in 2016.]. Moscow, 2017, 70 p. (in Russian)
 8. Dyukarev, E.A. *Prognoz glubiny promerzaniya pochvy s pomoshch'yu prostейshei regressionnoi modeli* [Forecast of the soil freezing depth using the simplest regression model]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 387, pp. 266–270. (in Russian)
 9. Dyukarev, A.G., Pologova, N.N., Lapshina, E.D., Berezin, A.E., Lgotin, V.A., Muldiyarov, E.Ya. *Prirodno-resursnoye raionirovaniye Tomskoi oblasti* [Natural-resource zoning of the Tomsk region]. Tomsk: Izd-vo "Spektr" IOA SO RAN. 1997. 40 p. (in Russian)
 10. Dyukarev, A.G., L'vov, Yu.A., Khmelev, V.A., et al. *Prirodnye resursy Tomskoi oblasti* [Natural resources of the Tomsk region] Novosibirsk. Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1991, 176 p. (in Russian)
 11. Kalyuzhnyi, I.L., Lavrov, S.A. *Mekhanizm vliyaniya glubiny promerzaniya pochv rechnykh basseinov na zimnii stok* [The mechanism of the influence of the soil freezing depth in river basins on the winter runoff]. *Vodnye resursy*, 2017, vol. 44, no. 4, pp. 442–451. (in Russian)
 12. Lgotin, V.A., Savichev, O.G., Makushin, Yu.V. *Mnogoletnie izmeneniya srednesezonnykh i srednegodovykh urovnei i temperatury podzemnykh vod verkhnei gidrodinamicheskoi zony v Tomskoi oblasti* [Long-term changes in average seasonal and annual mean levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in Tomsk Region] *Geoekologiya*, 2010, no 1. pp. 23–29. (in Russian)
 13. Mezentsev, V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselyakh* [Hydrological calculations for reclamation purposes]. Omsk. Omskii sel'skokhozyaistvennyi institut. 1982, 84 p. (in Russian)
 14. Moiseeva, Yu.A., Savichev, O.G. *Sposob rascheta i vozmozhnye izmeneniya podzemnogo stoka v Zapadnoi Sibiri v golocene* [Changes in groundwater flow in Western Siberia in Holocene]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 6–14. (in Russian)
 15. Motovilov, Yu.G. *Gidrologicheskoe modelirovanie rechnykh basseinov v razlichnykh prostranstvennykh masshtabakh 1. Algoritmy generalizatsii i osredneniya* [Hydrological modeling of river basins in different spatial scales 1. Algorithms of generalization and averaging]. *Vodnye resursy*, 2016, vol. 43, no 3, pp. 243–253. (in Russian)
 16. Naidenov, V.I. *Nelineinaya dinamika poverkhnostnykh vod sushy* [Nonlinear dynamics of surface waters of the land]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 318 p. (in Russian)
 17. Nepryakhin, E.M. *Pochvy Tomskoi oblasti* [Soils of Tomsk region]. Tomsk, Izd-vo Tom. gos. un-ta, 1977, 437 p. (in Russian)
 18. Pologova, N.N., Lapshina, E.D. *Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezhakh Bol'shogo Vasyuganskogo bolota* [Accumulation of carbon in peat deposits of the Greater Vasyugan bog]. *Bolshoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [The Greater Vasyugan bog. Current state and development processes]. Tomsk. Izd-vo IOA SO RAN, 2002, pp. 174–186. (in Russian)
 19. *Osnovnyye gidrologicheskie kharakteristiki. T. 15. Altai. Zapadnaya Sibir i Severnyi Kazahstan. T. 1. Verkhnyaya i Srednyaya Ob* [Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai. Western Siberia and Northern Kazakhstan. Vol. 1. The Upper and Middle Ob River]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979, 487 p. (in Russian)
 20. Savichev, O.G., Makushin, Yu.V. *Mnogoletnie izmeneniya urovnei podzemnykh vod verkhnei gidrodinamicheskoi zony na territorii Tomskoi oblasti* [Long-term changes in groundwater levels of the upper hydrodynamic zone in the territory of Tomsk region]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2004, vol. 307, no. 4, pp. 60–63. (in Russian)
 21. Savichev, O.G. *Vodnye resursy Tomskoi oblasti* [Water resources of Tomsk region]. Tomsk. Izd-vo Tomsk. politekhn. un-ta, 2010, 248 p. (in Russian)
 22. Speranskaya, N.A. *Potentsial'no vozmozhnoe i vidimoe isparenije i ego izmeneniya na evropeiskoi chasti Rossii za poslednie 50 let (po eksperimental'nym dannym)* [Potentially possible and visible evaporation and its changes in the European part of Russia over the past 50 years (according to experimental data)]. *Vodnye resursy*, 2016, vol. 43, no. 6, pp. 661–672. (in Russian)
 23. *Sostoyanie geologicheskoi sredy (nedr) territorii Tomskoi oblasti v 2014 g.* [State of the geological environment (subsurface) in the Tomsk region in 2014]. *Informatsionnyi byulleten. Vyp. 20*. AO "Tomskgeomonitoring". Tomsk: OOO "D-print", 2015, 84 p. (in Russian)
 24. *Sostoyanie geologicheskoi sredy (nedr) territorii Tomskoi oblasti v 2015 g.* [State of the geological environment (subsurface) in the Tomsk region in 2015]. *Informatsionnyi byulleten. Vyp. 21*. AO "Tomskgeomonitoring". Tomsk: OOO "D-print", 2016, 80 p. (in Russian)
 25. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements* – FAO Irrigation and drainage paper 56. Water Resources, Development and Management Service FAO. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 1998. 276 p.
 26. Hendriks, M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press. 2010. 331 p.
 27. 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.
 28. Shiklomanov, A.I., Lammers, R.B., Lettenmaier, D.P., Polischuk, Yu.M., Savichev, O.G., and Smith, L.G. *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.