

3. Дибиров Д.А., Гайдаров Г.М. Гидрогеологические условия мезозойскихложений платформенной части Восточного Предкавказья в связи с их нефтегазоносностью // Материалы конф. «Нефтегазоносность мезозойскихотложений Кавказа». Махачкала, 1986. С. 136–142.
4. Еременко Н.А., Михайлов И.И. и др. Методика картирования гидравлических ловушек нефти и газа // Сов. геол. 1975. № 9. С. 3–10.
5. Киссин И.Г. Гидродинамические аномалии в подземной гидросфере. М.: Наука, 1967. 136 с.
6. Мирзоев Д.А., Джанаридзе Л.И. и др. Некоторые аспекты превращения органического вещества и нефтегазообразование в осадочных толщах мезозоя Восточной части Предкавказья // Материалы докл. VI Всесоюз. Семинара «Теоретические, природные и экспериментальные модели нефтегазообразования и их использование в прогнозе нефтегазоносности». Л., 1989. С. 55–56.
7. Мирзоев Д.А. Нефтегазообразование и нефтегазонакопление в платформенных и складчатых районах Дагестана // Материалы 27-й сессии Междунар. геол. конгресса. М.: Наука, 1984.
8. Силин-Бекчурин А.И. Метод приближенного учета скоростей фильтрации и подземного стока рассолов по пьезометрам // Тр. лаб. гидрогеол. проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1949. Т.11. С. 130–137.
9. Соколов Б.А. Эволюционно-динамические критерии оценки нефтегазоносности недр. М.: Недра, 1985. С. 166–167.
10. Hubbert M. Entrapment of Petroleum under Hydrodynamic Conditions // Am. Assoc. Petrol Geol. Bull. 1953. Vol. 37 № 8. P. 1954–20206.
11. Шарафутдинов Ф.Г., Мирзоев Д.А. и др. Геология нефтегазовых месторождений Дагестана и прилегающей акватории Каспийского моря. Махачкала, 2001. 297 с.

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВОСТОКА ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ВОДНОБАЛАНСОВОЙ МОДЕЛИ WATBUG

Е.Е. Лапина¹, Т.В. Орехова²

¹ ИВП РАН, Москва, 119991, ул. Губкина, д. 3,

8(499)1355385, факс 8(499)1355615, shtriter_elena@rambler.ru;

² Геологический институт БАН, Болгария, София, 1113, ул. Акад. Г. Бончев, бл. 24,
факс +359 2 8724 638, tvorchova@gmail.com

Для восточной части Тверской области, характеризующейся избыточным увлажнением и соответственно промывным режимом почв, рассчитаны величины фактической эвапотранспирации и питания грунтовых вод за период 2001–2005. Для расчетов использована воднобалансовая модель WATBUG на месячной основе, где входными данными являются фактические величины количества осадков, температуры воздуха и диапазон продуктивной влаги в почве. Сравнение смоделированных величин инфильтрационного питания с результатами расчетов по режимным наблюдениям за уровнями грунтовых вод показало перспективность использования программы WATBUG.

Введение

Инфильтрационное питание подземных вод (ПВ) обычно определяется как нисходящий поток воды, поступающий на уровень ПВ, в результате чего наступает его подъем [8]. Многочисленные исследования показали, что питание ПВ отличается значительной пространственной и временной изменчивостью [3, 8]. Методов его оценки множество [5, 10]. Rushton (1988) ввел понятие «потенциальное питание ПВ», которое относится к превышению осадков над испарением [9].

Для оценки потенциального питания ПВ могут использоваться методы водного баланса, включая широко известную классическую модель водного баланса Thornthwaite & Mather [11].

Цель настоящего исследования – оценка питания ПВ и других элементов водного баланса восточной части Тверской области по климатическим данным за период 2001–2005.

Общие природные условия района исследований

Регион расположен в пределах Верхневолжской низины, с отметками поверхности земли 130–140 м, между $56^{\circ}21'$ и $56^{\circ}54'$ с.ш. и $36^{\circ}00'$ и $37^{\circ}10'$ в.д. Основной водной артерией является река Волга.

Климат региона умеренно-континентальный, с холодной зимой и умеренно теплым летом. Средняя годовая температура воздуха составляет $3,8^{\circ}\text{C}$, средняя относительная влажность воздуха – 69%; среднее годовое количество осадков по области колеблется от 560 до 720 мм, по району среднегодовое значение равно 593 мм [2, 6].

Устойчивый снежный покров образуется к середине декабря, держится 157–160 дней, начинает таять с середины марта и сходит в середине апреля [2]. Отношение количества осадков к величине испарения составляет около 1,2; влажность воздуха довольно высока на протяжении всего года и колеблется около 80% [2, 6].

Среди почв преобладают дерновые разной степени оподзоленности на суглинистых и супесчаных породах моренных, зандровых, озерно-ледниковых и древнеаллювиальных отложений. Среднегодовое (50% обеспеченности) запасы продуктивной влаги в метровом слое суглинистой почвы весной на дату перехода температуры через 10°C составляют 210 мм, супесчаной – 150–260 мм [6].

Метод

Оценка инфильтрационного питания ПВ проводилась с использованием программы WATBUG [13], основанной на известной модели баланса почвенной влаги [11]. Теоретическая основа модели представлена в табл. 1. Размерность балансовых элементов – в мм слоя воды, расчеты проводятся на ежемесячной основе. В этой модели используются термины «дефицит влаги» (deficit, DEF) и «избыток влаги» (surplus, SUR).

Таблица 1

**Балансовые расчеты почвенной влаги
по методу Thornthwaite & Mather, 1957 [7, 11]**

	Влажный период			Сухой период
	SUR = (P - Rs) - Eo > 0			SUR = (P - Rs) - Eo < 0
	W = W _{max}	W < W _{max}		
		SUR ≤ W _{max} - W	SUR > W _{max} - W	
W	W _{max}	S + (P - Rs) - Eo	W _{max}	W _{max} · exp(-APWL/W _{max})
R	(P - Rs) - Eo	0	(P - Rs) - Eo - (W _{max} - W)	0
E	Eo	Eo	Eo	(P - Rs) + ΔW
DEF	0	0	0	Eo - E

Обозначения к таблице 1:

- W – запасы продуктивной влаги в почвенном слое;
- W_{max} – диапазон продуктивной (активной) влаги (ДПВ);
- Rs – поверхностный сток;
- Eo – потенциальная эвапотранспирация (по методу Thornthwaite);
- E – фактическая эвапотранспирация;
- R – питание ПВ;
- APWL – сумма потенциальных потерь воды [Eo - (P - Rs)], относящаяся к последовательным сухим месяцам.

Поверхностный сток обычно предполагается равным определенному проценту от месячной суммы осадков (5–6%). Разница между оставшейся суммой осадков и потенциальной эвапотранспирацией (P - Rs - Eo) может быть как положительной (влажный период), так и отрицательной (сухой период). Избыток влаги, возникающий во время влажного периода, распределяется между почвой (пока она не насытится влагой) и подземными водами. Во время сухого сезона почвенная влага постепенно расходуется на испарение.

Для каждого месяца последовательно рассчитываются элементы баланса, которые находятся в первой колонке таблицы: запасы продуктивной влаги в почве, питание ПВ и фактическая эвапотранспирация. Для сухих периодов вычисляется сумма потенциальных потерь воды (APWL).

Необходимый набор исходных данных минимален: температура воздуха, осадки и несколько начальных параметров. Описанный метод успешно отражает сезонность балансовых элементов. Преимущество программы WATBUG состоит в облегчении трудоемкого процесса расчета баланса влаги в почве по климатическим данным, причем расчеты могут проводиться как на ежемесячной, так и на ежедневной основе.

К недостатку классического подхода [11] относится то, что поверхностный сток считается равным постоянному проценту от месячной суммы осадков независимо от сезона. Программа WATBUG вообще не оценивает поверхностный сток, поскольку он зависит от многочисленных характеристик конкретного участка. Этот метод также не учитывает влияния

определенного растительного покрова. Потенциальная эвапотранспирация определяется по Thornthwaite, однако для месяцев с отрицательной температурой этот метод дает нулевые значения, что нереально.

Независимо от ограничений метода, основанная на нем программа WATBUG продолжает успешно использоваться – например, для условий Бельгии, Танзании и Бурунди получены многолетние значения питания ПВ на основе климатических данных за период более 30 лет [7, 12]. При этом модель отражает существенную изменчивость питания ПВ в разные годы, связанную с колебаниями месячных осадков и температур.

Результаты

После введения необходимых данных (диапазон продуктивной влаги ДПВ задавался равным 150 и 200 мм), на выходе модели получены величины потенциальной и фактической эвапотранспирации, фактического запаса влаги в почвенном слое и инфильтрационного питания подземных вод.

На рис. 1 и рис. 2 показана динамика элементов водного баланса, рассчитанных по модели.

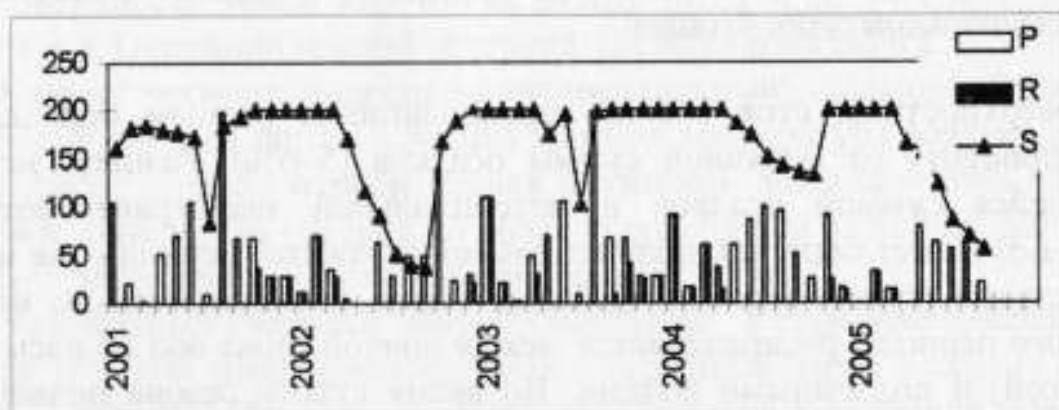


Рис. 1. Месячные осадки (P), питание ПВ (R) и фактический запас влаги в почве (S) в мм слоя за 2001–2005 гг., модель WATBUG (ДПВ = 200 мм)

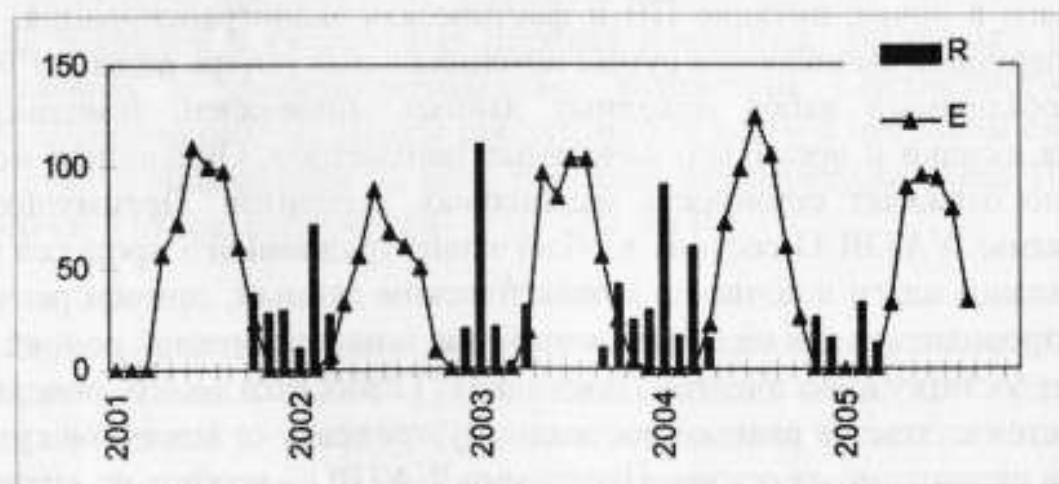


Рис. 2. Рассчитанное питание ПВ (R) и фактическая эвапотранспирация (E) для периода 2001–2005 гг., модель WATBUG (ДПВ = 200 мм)

Контролем достоверности полученных на модели значений питания ПВ послужили режимные данные в наблюдательной скважине 3020 первого от поверхности московского надморенного водно-ледникового водоносного горизонта (ВГ). Мощность горизонта до 10 м. Глубина залегания уровня 0,5–3,0 м. Наблюдения здесь велись в период 1994 – сентябрь 2005 г.

Скважина расположена на правом берегу Иваньковского водохранилища, в районе деревни Плоски Конаковского района Тверской области. Пойма и часть I террасы (аккумулятивной) затоплены, наблюдается слабый уклон поверхности террас в сторону водохранилища. Скважина находится в пределах II террасы (цокольной) на расстоянии 400 м от уреза водохранилища. Глубина скважины 6,5 м, абсолютная отметка устья 134,8 м. Верхняя часть разреза выполнена пылеватыми аллювиальными песками мощностью 1 м, залегающими на моренных суглинках.

Замеры уровней осуществлялись с частотой 5 раз в месяц. Для сбора выпадающих жидких и твердых осадков применялся осадкомер Третьякова О-1, для замеров температур – психрометр МВ-4М, метеопост д. Плоски.

При расчетах питания по режимным данным использована формула Н.Н. Биндемана [4, 5]:

$$R = \mu \cdot \sum_i \Delta h_i, \quad (1)$$

где Δh_i – амплитуды подъемов УГВ в разные периоды в течение года (мм), а μ – недостаток насыщения (водоотдача) пород в зоне аэрации, равный 0,08. Предыдущие (1997–1999) расчеты питания по режимным данным наблюдательных скважин указанного ВГ по формуле Биндемана показали, что при годовом количестве осадков 750 мм на зеркало грунтовых вод поступает 86 мм/год при преобладании суглинков в зоне аэрации, или 160–260 мм/год – при преобладании песков. При годовом количестве осадков 471 мм – соответственно 67 и 126–210 мм/год [1].

На рис. 3 показано сопоставление фактических приращений УГВ с рассчитанными на модели величинами питания. Модельные данные приведены с учетом формирования снежного покрова, когда из-за промерзания почвы прекращается питание ПВ, и последующего снеготаяния, когда происходит интенсивное восполнение запасов ПВ. Модель WATBUG в целом отражает сезонные колебания питания ПВ.

В табл. 2 представлены расчеты инфильтрационного питания ПВ за период 2001–2005 (2005 год – до 1 октября) по модельным данным и режимным наблюдениям. В последней колонке представлены расчетные данные с учетом формирования снежного покрова и последующего снеготаяния.

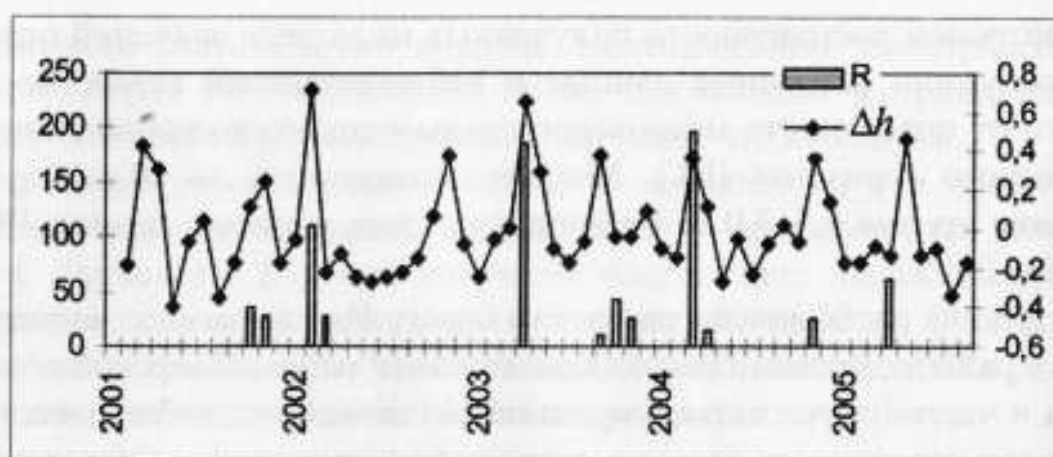


Рис. 3. Сопоставление фактических изменений УГВ (Δh , м) и расчетных величин питания ПВ (R , мм) при ДПВ = 200 мм

Таблица 2

Сравнительная таблица режимных и моделируемых величин инфильтрационного питания по скважине 3020, д. Плоски, 2001–2005 ($\mu = 0,08$)

Год	Осадки (P) мм/год	Режимные наблюдения	Модель		
		Питание R , мм (R/P , %)	Питание R , мм (R/P , %) при заданном ДПВ, мм		
			150	200	200*
2001	757	170 (22,4%)	118 (15,6)	94 (12,4)	65 (8,6)
2002	501	220 (43,9)	158 (31,5)	129 (25,9)	138 (27,5)
2003	761	230 (30,2)	280 (36,8)	271 (35,6)	262 (34,4)
2004	733	162 (22,1)	228 (31,1)	224 (30,6)	238 (32,5)
2005	327	57 (17,4)	46 (14,1)	46 (14,1)	61 (18,7)
Среднее	616	168 (27,2)	166 (27,0)	153 (24,8)	153 (24,8)

При статистической обработке величин питания 5-летнего массива месячных данных, смоделированных и рассчитанных аналитически по режимным замерам уровней, значимая корреляция ($r = 0,59$) получена только при учете накапливания и таяния снега. Такой коэффициент корреляции для коротких рядов наблюдений (5 лет в нашем случае) свидетельствует об успешности использования программы.

Средне-многолетнее значение годового питания ПВ за период 2001–2005 по модельным расчетам составляет при заданном влагозапасе 150 мм – 166 мм/год, при 200 м – 153 мм/год при среднегодовом количестве осадков за тот же период 616 мм/год; рассчитанная по режимным данным среднегодовая величина инфильтрационного питания составила 168 мм/год.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность применения программы WATBUG для оценки элементов водного баланса и изучения режима питания грунтовых вод, залегающих на глубине 0,5–3,0 м, в условиях гумидного климата (на примере Тверской области).

Сравнение с расчетами инфильтрационного питания по режимным данным в одиночной скважине по формуле Биндемана показали сходные результаты.

Литература

1. Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Лола М.В. Экологическое состояние природных вод водосбора Иваньковского водохранилища. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 240 с.
2. География Тверской области. – Тверь, 1992. – 288 с.
3. Ковалевский В.С. Гидрогеологическое обоснование совместного использования поверхностных и подземных вод в Московском регионе. – Водные ресурсы, 1996. – Т. 23. – № 4. – С. 472–480.
4. Ковалевский В.С. Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод. – М.: Научный мир, 2001. – 332 с.
5. Лебедев А.В. Оценка баланса подземных вод. М.: Недра, 1989. 174 с.
6. Мирзоев Е.С., Мирзоев А.Е. Конаковский район. Краеведческий справочник. – Тверь, 1995. – 330 с.
7. Bakundukize C., Van Camp M., Walraevens K. Estimation of groundwater recharge in Bugesera region (Burundi) using soil moisture budget approach. *Geologica Belgica*, 2011, 14/1–2: 85–102.
8. de Vries, J.J. and Simmers I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10 (3–4), 5–17.
9. Rushton K.R. Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. In: Simmers I. (ed) Estimation of natural groundwater recharge. 1988. NATO ASI Series C. 222. Reidel, Dordrecht, pp. 223–238.
10. Scanlon, B.R., R.W. Healy and P.G. Cook. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10 (3–4), 18–39.
11. Thornthwaite, C.W., J.R. Mather. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology*, 1957, 10(3): 183–311. Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey, USA.
12. Van Camp M., Martens K., Walraevens K. Impact of recent climate variability on an aquifer system in north Belgium. *Geologica Belgica*, 2012, 15/1–2: 73–80.
13. Willmott C.J. WATBUG: a Fortran IV Algorithm for Calculating the Climatic Water Budget, *Publications in Climatology*, 1977, 30 (2), 1–55. Centerton, New Jersey.