

УДК (556.3)

Е. А. Черкез, доктор. геол.-мин. наук, профессор
В. И. Шмуратко, доктор геол. наук, профессор
кафедра инженерной геологии и гидрогеологии,
Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина

РОТАЦИОННАЯ ДИНАМИКА И УРОВЕНЬ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА НА ТЕРРИТОРИИ ОДЕССЫ

Современная стратегия балансовых расчётов грунтовых вод нуждается в существенной корректировке. Главный её недостаток состоит в том, что она практически никак не учитывает роль геодинамического фактора. Наш главный вывод заключается в том, что наблюдаемые закономерности внутри- и межгодовой динамики уровня грунтовых вод (УГВ) Одессы обусловлены не приходными статьями баланса (какими бы они ни были), а расходными статьями и управляются главным образом динамикой напряженно-деформированного состояния (НДС) структурно-тектонических дрен на территории города.

Ключевые слова: уровень грунтовых вод, баланс грунтовых вод.

Введение

Одна из актуальных гидрогеологических и инженерно-геологических проблем Одессы — неуклонное повышение уровня грунтовых вод. Гидрогеологическая обстановка в городе продолжает ухудшаться, несмотря на ежегодные затраты на водопонижение. Новейшие эмпирические данные и теоретические разработки привели к необходимости создания новой концептуальной модели динамики грунтовых вод для территории города. Балансовые расчеты являются важной предпосылкой создания такой модели. В 1968, 1981 и 1990-х годах были выполнены расчеты баланса грунтовых вод для центральной части города [4]. Главный вывод, полученный их авторами, заключается в том, что основными приходными статьями баланса являются инфильтрация атмосферных осадков на незастроенных участках и инфильтрация за счет утечек из водопроводящих коммуникаций. Основная расходная статья, по этим же данным, — отток в нижележащий понтический водоносный горизонт. При этом считается, что переток происходит в местах отсутствия плиоценовых красных глин, на участках, примыкающих в балкам и оврагам, и в пределах берегового обрыва.

Однако новые данные и теоретические разработки [13, 14, 11] изменили представление о возможных механизмах динамики УГВ, выявив главный недостаток прежних

балансовых расчетов: в них никак не учитывалась чрезвычайно высокая геодинамическая подвижность геологической среды города. НДС массива водовмещающих и водоупорных пород, — изменяясь в широком частотном диапазоне во времени и закономерно структурируясь в пространстве, — создаёт тот пространственно-временной «каркас», в рамках которого и происходят наблюдаемые внутри- и межгодовые колебания УГВ.

В данной работе мы намерены обосновать тезис о том, что внутр.- и межгодовой колебательный режим УГВ на территории Одессы определяется не столько атмосферными осадками и водой техногенного происхождения, сколько законами изменения НДС массива пород, и что этот геодинамический фактор обязательно следует учитывать при балансовых расчетах. Дальнейшие усилия, направленные на разработку стратегии долгосрочного прогноза динамики грунтовых вод, не будут эффективными, если не будет разработана методика количественного учёта роли геодинамического фактора. А он, судя по тому, что нам уже известно, тесно связан с изменчивостью осевого вращения Земли и некоторыми другими внешними причинами, которые в традиционных балансовых расчётах обычно не учитываются.

Из сказанного не следует, что мы отрицаем роль техногенного фактора. Более того, его мы рассматриваем, — как и многие, — в качестве главной положительной статьи современного баланса грунтовых вод города. Однако в данной работе речь идёт о закономерностях *динамики* УГВ (с целью долгосрочного прогноза) и о возможных факторах, управляющих этой внутри- и межгодовой динамикой.

Фактический материал

В работе использованы наблюдения среднемесячного высотного положения УГВ в 1972–2000 гг. по 88 наблюдательным скважинам, расположенным на территории площадью 25,8 км², северную треть которой занимает исторический центр города, а оставшуюся южную часть — малоэтажная застройка 1950–60-х годов и кварталы многоэтажных, в основном жилых, зданий второй половины 20-го века. Использовались также эквидистантные временные ряды (с шагом 1 месяц): (1) объём обводнённой толщи четвертичных пород почвенно-лессовой формации, вмещающих грунтовые воды (временной ряд вычислен нами на основе данных гидрогеологического мониторинга, который проводится Управлением инженерной защиты территорий и развития побережья (Одесса)), (2) количество атмосферных осадков, (3) скорость осевого вращения Земли (данные сайта <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>), (4) данные суммарного среднегодового дебита 12-ти водоотводящих штолен дренажной галереи, расположенной вдоль одесского берега на протяжении 11 км (данные Управления инженерной защиты территорий и развития побережья).

Межгодовая динамика УГВ на территории Одессы

Характерные глубины залегания грунтовых вод на изученной территории Одессы неодинаковы для разных участков и, к тому же, не остаются неизменными. Поэтому возникла необходимость в построении карт гидроизогипс для разных временных срезов, с тем, чтобы затем на их основе типизировать изучаемую территорию города по средней годовой и межгодовой глубине УГВ и определить относительную суммарную площадь участков с различной глубиной залегания грунтовых вод. Контуры участка, для которого выполнялась типизация, а также расположение наблюдательных гидрогеологических скважин показаны на рис. 1.

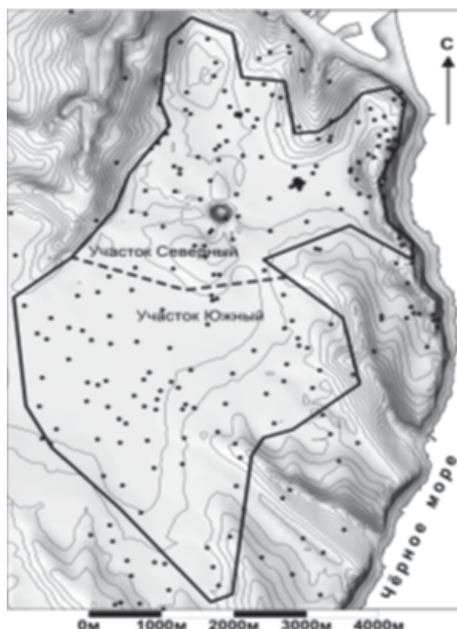


Рис. 1. Контуры участка на территории Одессы, для которого межгодовая динамика УГВ изучена методом интегральной оценки [13, 15] с шагом 1 месяц по 88 наблюдательным скважинам за период с 1972 по 2000 гг. Черные точки — наблюдательные гидрогеологические скважины

Методика интегральной оценки межгодовой динамики УГВ (далее — методика интегральной оценки) состоит в следующем [13, 15]. По данным наблюдательных скважин гидрогеологического мониторинга строится карта гидроизогипс четвертичного водоносного горизонта для заданного временного среза. Затем на основе этой карты вычисляется объем обводненной лессовой толщи (V) между зеркалом грунтовых вод и некоторой горизонтальной поверхностью выше кровли водоупорных пород. В нашем случае удобной оказывается поверхность с абсолютной отметкой +46 м, поскольку при таком выборе в пределах всего интервала наблюдений площадь обводненных пород в пределах участка не изменяется, а объем обводненной толщи не уменьшается до нуля. Построение карт гидроизогипс и вычисление объема обводненной лессовой толщи производится для необходимого количества последовательных временных срезов. В нашем случае вычисления выполнялись для каждого месяца на интервале с 1972 по 2000 гг., т.е. всего было построено 348 карт и вычислено столько же значений V . На заключительном этапе по этим данным строится график изменения параметра V во времени (рис. 2), который дает представление об интегральном характере межгодового и внутригодового изменения УГВ на изучаемой территории.

Результаты, полученные методом интегральной оценки в течение последнего десятилетия показали [13–15], что для территории Одессы характерна важная закономерность, связанная с межгодовым режимом УГВ. Она заключается в том, что объем обводненной толщи лессовидных суглинков на территории города (и, следовательно, УГВ) испытывает закономерное квазипериодическое изменение. Существует два характерных периода этих изменений. Один из них равен году, а второй соответствует продолжительности цикла солнечной активности (далее условно

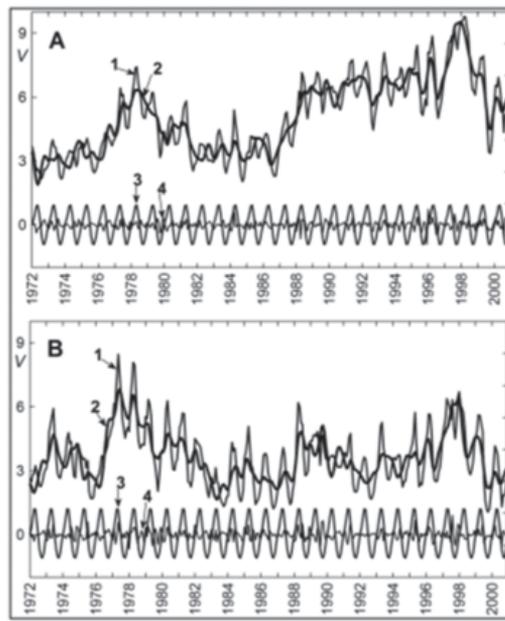


Рис. 2. Изменение объема обводненной толщи почвенно–лесовых четвертичных отложений в пределах участка, показанного на рис. 1 [14]. А – участок Северный, В – участок Южный. 1 – кривая параметра V над гидроизогипсой +46 м, в млн. м³; 2, 3, 4 – межгодовой тренд, сезонная компонента, случайная компонента параметра V , соответственно

будем называть этот цикл 11-летним). В годовом цикле в среднем для изученной территории максимально высокое положение УГВ наблюдается в мае, а максимально низкое – в октябре. Что касается 11-летнего цикла, то максимально высоко УГВ располагается в те годы, когда с наибольшей скоростью возрастает солнечная активность. Обычно это происходит через 1–3 года после очередного минимума солнечной активности (т.е. после начала очередного солнечного цикла).

Для грунтовых вод Одессы указанная закономерность наблюдалась уже трижды. С учетом указанной цикличности, на территории Одессы за весь период наблюдений (1972–2001 гг.) максимально высоко УГВ располагался в мае 1978 года, а максимально низко – в октябре 1986 года. Поэтому, учитывая цель данной работы, карты глубины залегания УГВ были построены именно для этих временных срезов (рис. 3).

Средняя по территории глубина УГВ в мае 1978 г. составила 4,32 м, а в октябре 1986 г. – 5,94 м. Таким образом, межгодовой диапазон изменения УГВ в среднем по городу за период наблюдений достигал величины 1,62 м. Очевидно, что на локальных участках этот диапазон может варьировать в широких пределах, как в меньшую, так и в большую сторону. На основе каждой из карт, показанных на рис. 3, вычислялась величина суммарной площади участков с заданным диапазоном глубины залегания УГВ (табл. 1).

Из таблицы видно, что в течение изученного интервала времени наибольшую площадь занимают участки, где УГВ бывает на глубине от 3 до 6 метров (в среднем – 4,5 м). Суммарная площадь таких участков составляет 17,33 млн. м², или 68,07 %. Площадь участков с глубиной УГВ менее 3 метров (в среднем 2,5 м, если учесть процент площади по каждому метровому диапазону) равна 13,28 млн. м² (13,28 %). На 18,65 % изученной площади УГВ не достигает глубин менее 6 м.

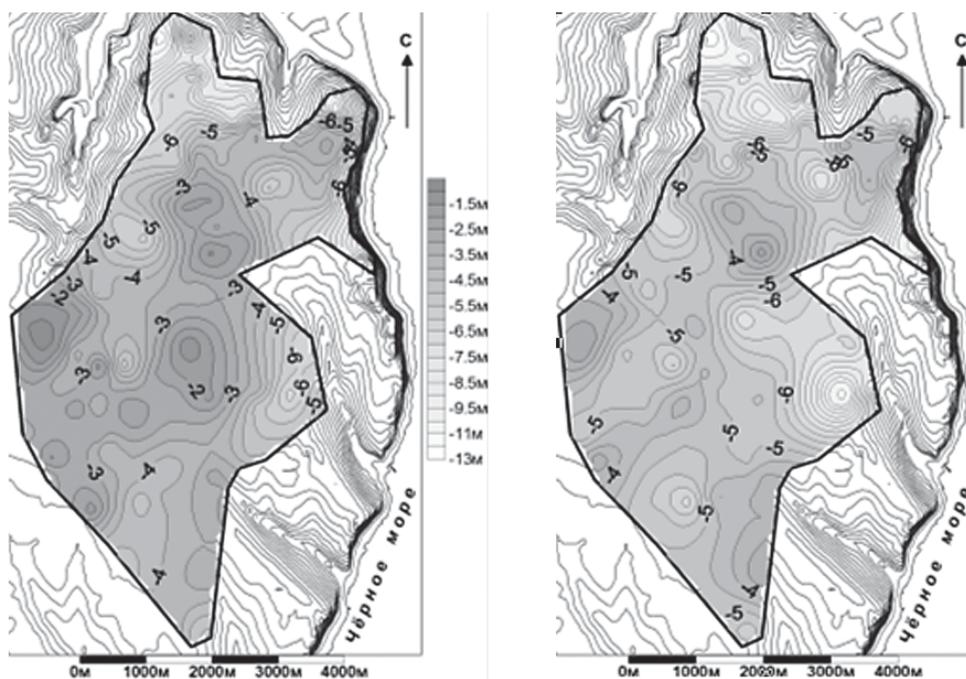


Рис. 3. Максимально высокое (слева: май 1978 года) и максимально низкое (справа: октябрь 1986 года) положение УГВ (в метрах) относительно дневной поверхности.

Инфильтрация атмосферных осадков в условиях степной зоны Украины

Для оценки относительной роли атмосферных осадков в балансе грунтовых вод территории Одессы нами использованы результаты работы [5], где приводятся данные анализа многолетних лизиметрических наблюдений, проведенных в степной зоне юга Украины. Автору указанной работы удалось выявить закономерности внутригодовой изменчивости баланса грунтовых вод в зависимости от глубины залегания УГВ.

В табл. 2 показаны значения величин инфильтрации (I) и расхода (U) грунтовых вод в лизиметрах для шести глубинных уровней. Эти значения получены в результате обобщения данных для каждого месяца и дают представление о балансе грунтовых вод в годовом цикле. Из таблицы видно, что, несмотря на неустойчивость внутригодовых распределений водобалансовых показателей, достаточно четко прослеживается тенденция к стабилизации их значений с увеличением глубины залегания УГВ. Еще лучше эта особенность выявляется на диаграммах внутригодового распределения инфильтрации и расхода атмосферных осадков (рис. 4).

Диаграммы, представленные на рис. 4, построены И. В. Зелениным на основе анализа многолетних лизиметрических наблюдений, выполненных в степной зоне юга Украины, в том числе и в регионах, расположенных в непосредственной близости от Одессы. Они дают возможность получить количественную оценку обмена грунтовых вод с атмосферой и вычислить количество атмосферных осадков, реально достигающих зеркала грунтовых вод и участвующих в их годовом балансе в условиях степной зоны.

Таблица 1

Средняя глубина залегания УГВ на территории Одессы в 1972–2000 гг.

Интервал глубин, в метрах	Площадь в мае 1978 г., в млн. м ²	Площадь в октябре 1986 г., в млн. м ²	Интервал глубин, в метрах	Средняя многолетняя площадь, в млн. м ²	Средняя многолетняя площадь, в %	
0–1	0,11	0	0–1	0,06	0,24	13,28
0–2	1,15	0	1–2	0,52	2,04	
0–3	6,67	0,08	2–3	2,80	11,0	
0–4	16,57	2,46	3–4	6,14	24,12	68,07
0–5	20,41	10,22	4–5	5,80	22,78	
0–6	22,87	18,54	5–6	5,39	21,17	
0–7	24,04	21,94	6–7	2,28	8,96	18,65
0–8	24,72	23,56	7–8	1,15	4,52	
0–9	25,37	24,78	8–9	0,94	3,69	
0–10	25,56	25,35	9–10	0,38	1,48	

В соответствии с табл. 2, для глубин 2,5 и 4,5 м для каждого месяца вычислялись величины инфильтрации ($I_{2,5}$ и $I_{4,5}$) и расхода ($U_{2,5}$ и $U_{4,5}$) атмосферных осадков. Например, для глубины 2,5 м инфильтрация в январе $I_{2,5}^1 = 16,1$ мм $((18,2+14,0)/2)$, а для глубины 4,5 м $I_{4,5}^1 = 12,0$ мм $((13,8+10,2)/2)$. Эти глубинные урны — 2,5 и 4,5 м — выбраны, исходя из сказанного в предыдущем разделе. Судя по данным работы [5], при залегании УГВ глубже 6 метров инфильтрация составляет сравнительно незначительную величину. Кроме того, табличные данные для этих глубин в работе [5] не приводятся.

Поэтому в дальнейшем этот глубинный уровень во внимание не принимался (суммарная площадь участков с таким УГВ равна 18,65 % (таб. 1)), и все расчеты строились на основе данных до глубины 6 м. Если суммарную площадь оставшейся территории принять за 100 %, то участки с глубиной УГВ на отметке 2,5 составят 16 %, а участки с глубиной УГВ 4,5 м — 86 %. В соответствии с этим, полученные величины $I_{2,5}$ и $U_{2,5}$ для каждого месяца складывались с соответствующими величинами $I_{4,5}$ и $U_{4,5}$. При этом параметры $I_{2,5}$ и $U_{2,5}$ умножались на коэффициент 0,16, а параметры $I_{4,5}$ и $U_{4,5}$ — на коэффициент 0,86. В результате получены «балансовые» поправки W на инфильтрацию и расход для территории Одессы (таб. 3). По данным табл. 3 построены графики сезонного изменения инфильтрационной и расходной составляющих атмосферных осадков в годовом балансе грунтовых вод на территории Одессы (рис. 5, А).

На рис. 6 показан исходный ряд количества атмосферных осадков (далее параметр P), а на рис. 7 — параметры P и $P_{эфф}$. $P_{эфф}$ — это такое количество атмосферных осадков, которое достигает глубины зеркала грунтовых вод и, следовательно, реально принимает участие в динамике УГВ (далее — эффективные атмосферные осадки).

Сравнение графиков верхней и нижней панелей на рис. 5 показывает, что сезон максимального количества атмосферных осадков (лето-осень) практически совпадает с периодом аномально большого их расхода за счет испарения и транспирации. В течение остальной

Таблица 2

Среднее многолетнее значение месячных сумм инфильтрации и расхода, мм [5]

Глубина, м	Значения параметров по месяцам											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
ИНФИЛЬТРАЦИЯ (I)												
0,5	32,0	39,7	24,4	16,3	23,1	27,2	41,6	36,7	25,5	4,2	12,3	29,8
1,0	22,4	28,0	29,6	13,3	13,4	9,2	13,1	11,8	9,8	6,5	14,7	25,9
2,0	18,2	22,7	22,8	12,4	10,3	7,8	4,3	5,1	4,0	4,2	8,2	18,9
3,0	14,0	14,7	18,9	13,1	9,9	6,8	5,0	3,1	3,0	3,8	5,1	12,1
4,0	13,8	11,8	13,0	8,4	6,2	6,0	5,1	2,2	3,9	2,5	2,4	10,0
5,0	10,2	11,9	12,0	9,0	6,1	4,2	5,8	2,2	2,0	3,1	2,3	4,5
РАСХОД (U)												
0,5	20,0	19,8	17,7	31,5	66,0	100,6	113,5	74,5	42,3	23,9	11,7	15,6
1,0	10,1	7,3	5,4	15,2	46,1	64,8	67,2	59,0	34,1	12,4	7,1	5,3
2,0	4,2	4,0	2,1	5,8	15,9	25,1	27,2	28,0	16,2	9,8	5,9	4,0
3,0	3,0	2,5	1,1	1,3	4,2	9,0	11,9	16,8	12,7	7,1	4,8	3,2
4,0	2,1	1,2	0,0	1,1	3,7	4,2	5,1	5,8	6,0	3,9	3,5	4,2
5,0	2,2	1,7	1,0	1,2	1,3	3,0	3,7	4,0	3,2	2,9	2,3	2,9
БАЛАНС (W=I-U)												
0,5	12,0	19,9	6,7	-15,2	-42,9	-73,4	-71,9	-37,8	-1,6	-19,7	0,6	14,2
1,0	12,3	20,7	24,2	-1,9	-32,7	-55,6	-54,1	-47,2	-24,3	-5,9	7,6	20,3
2,0	14,0	18,7	20,7	6,6	-5,6	-17,3	-22,9	-22,9	-12,2	-5,6	2,3	14,9
3,0	11,0	12,0	17,8	11,8	5,7	-2,2	-6,9	-13,7	-9,7	-3,3	0,3	8,9
4,0	11,7	10,6	13,0	7,3	2,5	1,8	0,0	-3,6	-2,1	-1,4	-1,1	5,8
5,0	8,0	10,2	11,0	7,8	4,8	1,2	2,1	-1,8	-1,2	0,2	0,0	1,6

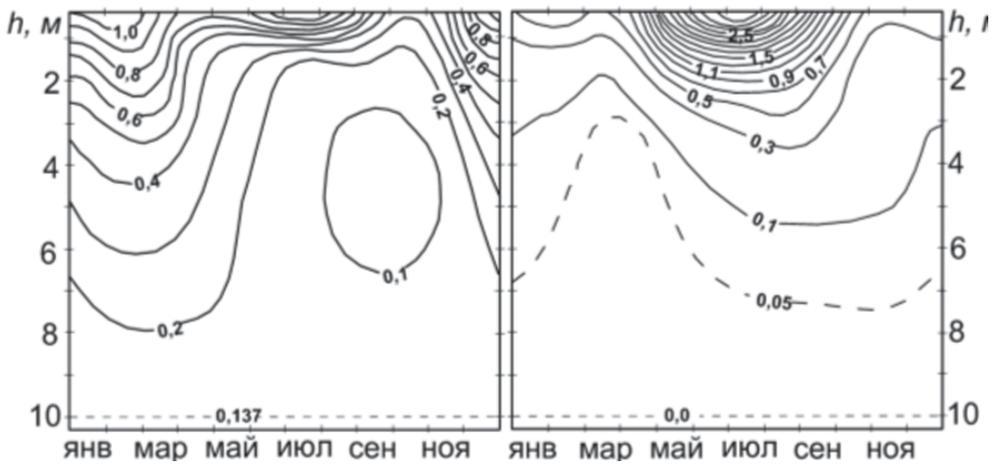


Рис. 4. Внутригодовое распределение инфильтрации (слева) и расхода (справа) атмосферных осадков в зависимости от глубины в степной зоне Украины [5]

части года (зима-весна), когда инфильтрация потенциально способна существенно повлиять на сезонную динамику УГВ, — в это время на территории Одессы количество осадков минимально. Очевидно, что при таких соотношениях инфильтрации, расхода и количества атмосферных осадков роль последних во внутригодовой динамике УГВ города не может быть значимой. Справедливость данного вывода иллюстрируется рисунками 6 и 7.

Рис. 7 позволяет сформулировать несколько важных выводов. Максимальное годовое количество осадков, которые потенциально способны влиять на динамику УГВ, т.е. количество эффективных осадков, не превышает 8,6 см/год, тогда как максимальное количество выпадавших осадков (76,5 см/год) почти на порядок больше. Очевидно

Таблица 3

Балансовые поправки на инфильтрацию (I) и расход (U) для территории Одессы.

месяц	$I_{2,5}$	$I_{4,5}$	I	$U_{2,5}$	$U_{4,5}$	U
январь	16,10	12,00	12,66	3,60	2,15	2,38
февраль	18,70	11,85	12,95	3,25	1,45	1,74
март	20,85	12,50	13,84	1,60	0,50	0,68
апрель	12,75	8,70	9,35	3,55	1,15	1,53
май	10,10	6,15	6,78	10,05	2,50	3,71
июнь	7,30	5,10	5,45	17,05	2,60	5,75
июль	4,65	5,45	5,32	19,55	4,40	6,82
август	4,10	2,20	2,50	22,40	4,90	7,70
сентябрь	3,50	2,95	3,04	14,45	4,60	6,18
октябрь	4,00	2,80	2,99	8,45	3,40	4,21
ноябрь	6,65	2,35	3,04	5,35	2,90	3,29
декабрь	15,50	7,25	8,57	3,60	3,55	3,56

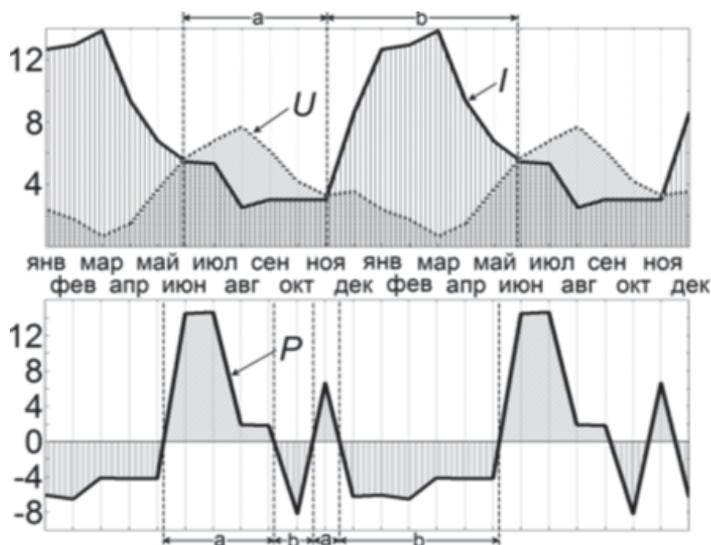


Рис. 5. Сезонный анализ параметров баланса атмосферных осадков. *Вверху*: внутригодовая изменчивость баланса атмосферных осадков на территории Одессы, вычисленная на основе данных работы [5] по указанной выше методике (I – инфильтрация (мм/мес), U – расход (мм/мес)). Выделяются два интервала с противоположным соотношением инфильтрационной и расходной составляющих атмосферных осадков: a – расход на испарение и транспирацию больше инфильтрации (июнь–ноябрь), b – инфильтрация больше, чем расход на испарение и транспирацию (декабрь–май). *Внизу*. Средняя многолетняя (за период 1972–2007 гг.) внутригодовая изменчивость количества атмосферных осадков (P) (мм/мес) на территории Одессы. Выделяется два типа интервалов с количеством осадков: a – больше среднего многолетнего (июнь–сентябрь и ноябрь), b – меньше среднего многолетнего (октябрь и декабрь–май).

также, что если бы УГВ предопределялся только количеством атмосферных осадков, то максимальный диапазон межгодовых колебаний уровня не мог бы превысить 3–4 см. Фактически же во многих наблюдательных скважинах диапазон межгодовых вариаций УГВ часто достигает 1–1,5 м. Что касается диапазонов месячных колебаний УГВ, то они, судя по приведенным выше данным, не могли бы превышать 1,5 см, если бы уровень целиком определялся только атмосферными осадками. Кроме того, следует учитывать, что значительная часть территории города покрыта асфальтом и застроена. Это обстоятельство дополнительно уменьшает и без того незначительное участие атмосферных осадков в динамике УГВ. И наконец, существенная доля выпадающих атмосферных осадков через ливневые стоки попадает непосредственно в водоотводящую систему, т.е. переходит в категорию техногенных вод и может участвовать в динамике УГВ только в случае повреждения водонесущих коммуникаций.

Итак, естественные условия степной зоны создают своеобразный «порог» для проникновения атмосферных осадков вглубь. Для территории Одессы этот порог составляет приблизительно 1,5 см/мес. Таким образом, максимальная месячная амплитуда колебаний УГВ, обусловленная атмосферными осадками, на территории города не может

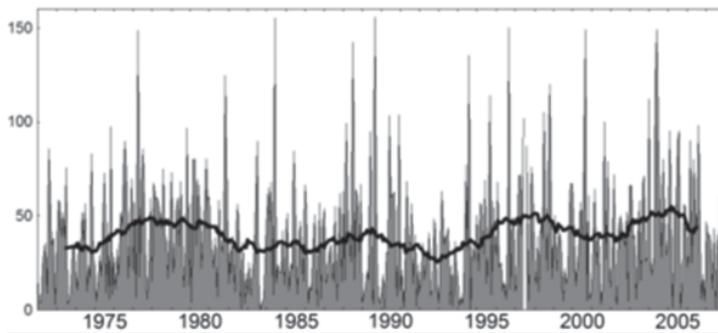


Рис. 6. Исходный временной ряд количества атмосферных осадков на территории Одессы (параметр P) (мм/мес). Жирная линия — скользящее среднее с шириной окна сглаживания, равной 36 месяцам.

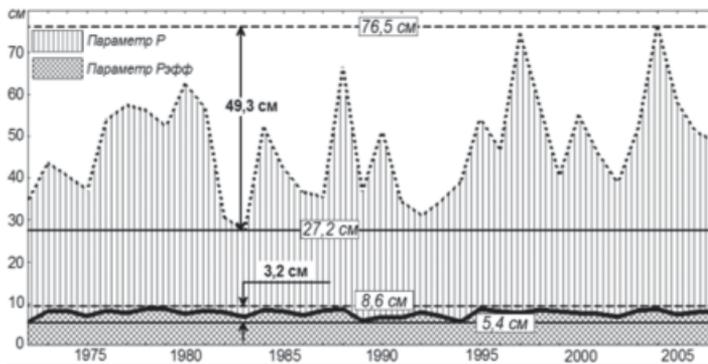


Рис. 7. Суммарное годовое количество осадков, выпавших на территории Одессы (параметр P), и осадков, реально участвующих в динамике УГВ (параметр $P_{эфф}$).

превышать 1,5 см, а годовая — 3–4 см. В то же время, в подавляющем большинстве наблюдательных гидрогеологических скважин названные характеристики имеют намного большие величины.

Возникает вопрос: если исключить атмосферные осадки как главную причину, то какие управляющие факторы следует считать главными при создании оптимальной модели внутригодовой и межгодовой динамики УГВ? Один из возможных ответов можно получить, если обратиться к модели, которая разработана нами несколько лет назад. Речь идет о модели космозависимой динамики напряженно-деформированного состояния пород [13, 15].

Модель космозависимой динамики НДС массива пород

В работе [13] предложена модель космозависимой динамики НДС пород верхней зоны земной коры и, как её частный случай, связанный с динамикой УГВ, — модель структурно-тектонического дренажа. Хотя базовые положения модели имеют универсальный характер, в контексте данной статьи они обсуждаются применительно лишь к территории Одессы.

Согласно модели структурно-тектонического дренажа, важной отрицательной статьёй баланса грунтовых вод Одессы следует считать их вертикальный переток в нижележащий понтический водоносный горизонт. Переток происходит по зонам повышенной проницаемости, рассекающим плиоцен-плейстоценовую почвенно-лёссовую формацию, меотические глины и понтические известняки. Зоны проницаемости обладают важным признаком планетарной трещиноватости: они ориентированы преимущественно по четырём направлениям — двум ортогональным и двум диагональным — относительно географической системы координат. Система микроблоков, ограниченных зонами повышенной проницаемости, образует иерархическую последовательность с характерным «тектоническим» шагом 30–60, 100–200, 400–600, 800–1200 м и более [3, 12, 13].

В соответствии с моделью структурно-тектонического дренажа, разнопорядковые зоны повышенной проницаемости в первую очередь реагируют на изменение некоторых управляющих факторов, в первую очередь, — на изменение скорости осевого вращения Земли. Это приводит к соответствующим изменениям НДС пород верхних горизонтов геосреды города. В результате либо увеличивается, либо уменьшается гидравлическая эффективность зон повышенной проницаемости («структурно-тектонических дрен»). Частотный спектр, характерный для изменения гидравлической эффективности, зависит как от иерархического уровня зон проницаемости, так и от частотных характеристик внешнего управляющего фактора. На тех интервалах времени, когда внешние управляющие факторы приводят к увеличению гидравлической эффективности структурно-тектонических дрен, вертикальный переток грунтовых вод усиливается и их уровень падает. При уменьшении их гидравлической эффективности УГВ повышается из-за статистически непрерывного пополнения за счёт техногенных источников. Сравнительный анализ соответствующих временных рядов подтверждает справедливость модели структурно-тектонического дренажа [13, 15]. В частности, в следующем разделе мы попытаемся обосновать наличие связи между динамикой грунтовых вод на территории Одессы и осевым вращением Земли.

Грунтовые воды на территории Одессы и вращение Земли

Сезонный анализ временных рядов 1972–2000 гг. выявляет достаточно очевидный синхронный характер внутригодовых вариаций УГВ на территории Одессы и вариаций скорости осевого вращения Земли (рис. 8).

Давно известно, что скорость осевого вращения Земли не остается постоянной, а закономерно изменяется в годовом цикле [8–10 и др.]. Для изученного нами интервала времени рисунок 7 выявляет следующие закономерности. В течение июня-сентября наблюдается более быстрое, а в октябре-мае более медленное вращение планеты относительно средней многолетней скорости. Кроме того, интервал замедленного вращения осложнен «волной» второго порядка: в декабре-январе скорость вращения несколько увеличивается, не достигая, однако, величины средней многолетней.

Результаты сезонного анализа показывают, что на интервале ускоренного вращения Земли УГВ на изученной территории Одессы понижается, а на интервале замедленного вращения повышается. Более того, в последнем случае в динамике УГВ наблюдается «волна» второго порядка, соответствующая подобной «волне» скорости вращения Земли. Это хорошо видно на рис. 8, А и 8, С. Таким образом, можно заключить, что в масштабе годовой цикличности имеет место по крайней мере *синхронность* двух событий — неравномерности суточного вращения Земли и изменения УГВ на территории города. Возникает вопрос: существует

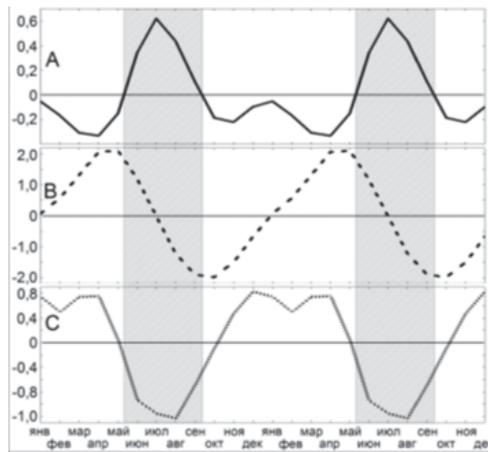


Рис. 8. Сезонный анализ внутригодовой динамики УГВ на территории Одессы за период с 1972 по 2000 г. А – сезонная компонента скорости осевого вращения Земли ($n \cdot 10^{-12}$ рад/с); В – сезонная компонента объема обводненной лессовой толщи над уровнем +46 м (млн. м³) (временной ряд параметра V , вычисленного методом интегральной оценки) в пределах участка, показанного на рис. 1 [14]. Учитывая методику вычисления параметра V , его можно интерпретировать как показатель изменения высоты «купола» грунтовых вод, т.е. как интегральный показатель изменения УГВ; С – первая производная сезонной компоненты параметра V .

ли подобная синхронность в масштабе *межгодовых* вариаций? Анализ соответствующих временных рядов свидетельствует в пользу положительного ответа на этот вопрос (рис. 9).

График 1 рисунка 9 построен следующим образом. По результатам интегральной оценки объема обводненной лессовой толщи для каждого года выбирались те месяцы, когда УГВ занимал экстремальное положение, т.е. наиболее низкое и наиболее высокое в данном году. Разность объемов обводненной толщи между этими месяцами, т.е. максимальный в данном году диапазон изменения УГВ затем пересчитывался в «эквивалентные метры» путем деления объема обводненной лессовой толщи на площадь исследуемой территории. Таким образом, график 1 интегрально (т.е. в среднем по всей исследуемой территории) отражает максимальный диапазон внутригодового изменения УГВ.

Из рис. 9 видно, что внутригодовой диапазон на изученном интервале времени изменялся от 0,2 м (1990 г.) до 0,9 м (1981 г., 1999 г.). Кроме того, рис. 9 дает основания считать, что между скоростью вращения Земли и динамикой УГВ есть достаточно заметная синхронность. Интервалы увеличения скорости вращения Земли (1972–1986, 1993–2000 гг.) совпадают с интервалами увеличения внутригодового диапазона изменения УГВ. При замедления вращения Земли (1986–1993 гг.) внутригодовой диапазон изменения УГВ уменьшается (1986–1990 гг.).

Известно, что вариации скорости вращения Земли тесно коррелируют с многими физическими и метеорологическими характеристиками атмо-гидросферы [9, 10]. Одной из таких характеристик потенциально может быть количество атмосферных осадков на той или иной территории. Однако, напомним (см. выше), что в условиях степной зоны Украины такой важный для нас фактор, как атмосферные осадки, не способны изменять УГВ в диапазоне более 0,1 м. Поэтому мы вряд ли вправе говорить о том, что динамика УГВ обусловлена



Рис. 9. Внутригодовой диапазон изменения УГВ на изученной территории Одессы (кривая 1) (эквивалентные метры) (левая ось) и отклонение скорости суточного вращения Земли от стандартной (кривая 2) ($n \cdot 10^{-12}$ рад/с) (правая ось).

влиянием вариаций вращения Земли на динамику атмосферы и через нее — на количество атмосферных осадков. Следует, видимо, искать иной (не через посредство увлаженности территории за счет атмосферных осадков) механизм влияния вариаций скорости вращения Земли на УГВ, если, конечно же, синхронность событий, показанная на рис. 8 и 9, не является простым совпадением либо синхронностью событий, не связанных между собой генетически.

В 1960-х годах в береговой зоне Одессы создан комплекс противооползневых сооружений. Ключевым элементом комплекса являются подземные дренажные сооружения, которые включают три основных элемента: линейный ряд протяженностью около 3,3 км из 144 фильтроскважин, расположенных на расстоянии 15–25 м друг от друга, дренажную галерею совершенного типа протяженностью около 11 км, которая пройдена в коренных породах на контакте меотических глин и понтических известняков параллельно береговой линии на расстоянии 100–180 м от оползневого склона и водоотводящие штольни, отстоящие друг от друга примерно на 1 км, ориентированные по нормали к береговой линии и соединяющиеся с галереей в коренном массиве. Фильтроскважины частично перехватывают грунтовые воды города и осуществляют их сброс в дренажную галерею и затем — в водоотводящие штольни. По различным причинам, в основном технического характера, анализ дебита отдельных штолен на значимом интервале времени невозможен. Поэтому мы сконцентрировали внимание на данных суммарного ежемесячного дебита всех 12-ти штолен, полагая, что этот параметр интегрально характеризует объем сброса грунтовых вод фильтроскважинами и их перетока по различным путям в нижележащий понтический водоносный горизонт.

На рис. 10 показаны результаты выполненного нами сравнительного анализа суммарного дебита штолен Одесского побережья, внутригодового диапазона вариаций УГВ и скорости вращения Земли. К сожалению, совместный интервал наблюдений трёх рассматриваемых характеристик непродолжителен (1972–1980 гг.). На этом небольшом интервале выявляется очевидная прямая зависимость между всеми тремя параметрами: увеличение дебита штолен и диапазона внутригодовых вариаций УГВ происходят синхронно с ускорением вращения Земли. В рамках модели СТД этот факт можно интерпретировать так: ускоренное вращение Земли приводит к увеличению гидравлической эффективности структурно-тектонических дренажей и, как следствие, — к усиленному перетоку грунтовых вод в нижележащий понтический горизонт. Величина внутригодового диапазона изменения УГВ, согласно модели СТД,

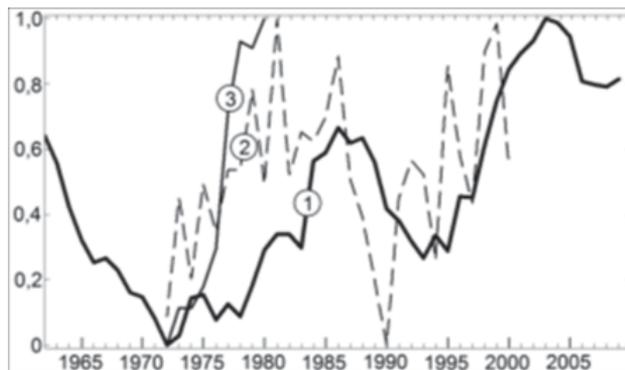


Рис. 10. Отклонение скорости вращения Земли от стандартной (1), внутригодовой диапазон изменения УГВ из изученной территории Одессы (2) и суммарный дебит 12-ти штолен Одесского побережья (3). Все кривые нормированы.

зависит главным образом от интенсивности их перетока вниз через структурно-тектонические дрены: чем больше переток вниз, тем больше внутригодовой диапазон изменения УГВ, поскольку межгодовые вариации приходной статьи баланса грунтовых вод (атмосферные осадки и утечки водонесущих коммуникаций) можно считать малозначительными. Очевидно, что вывод о положительной связи между рассмотренными характеристиками на протяжении длительных интервалов времени остается пока под вопросом: слишком мало фактических данных.

Обсуждение результатов и выводы

Атмосферные осадки не играют принципиальной роли в балансе грунтовых вод на территории Одессы. Это связано с тем, что в условиях степной зоны Украины лишь незначительное количество выпадающих атмосферных осадков имеет возможность проникнуть достаточно глубоко в четвертичные отложения почвенно-лессовой формации и достигнуть гипсометрического уровня, к которому приурочено зеркало грунтовых вод. Количественные оценки, выполненные на основе работы [5] и данных гидрогеологического мониторинга на территории Одессы в течение 1972–2000 гг., показывают, что существует естественный «порог», который позволяет атмосферным осадкам изменять УГВ в месячном масштабе всего лишь на 1,5 см, а в годовом масштабе — на 3–4 см. В то же время, известно, что реально наблюдаемые вариации — и в месячном, и в годовом масштабе — на порядок больше. Перечень локальных и региональных факторов, традиционно учитываемых в качестве предопределяющих динамику УГВ на территории Одессы, известен: атмосферные осадки, утечки техногенной природы (приходные статьи баланса), испарение, транспирация, вертикальный переток через естественные «гидрогеологические окна», боковой отток на склонах балок и береговых обрывов (отрицательные статьи баланса). И если выясняется, что атмосферные осадки не могут играть принципиально важной роли в динамике УГВ, необходимо «выбрать» из перечисленных выше факторов, те, которые потенциально можно считать ключевыми при создании модели динамики УГВ. Проанализируем с этой точки зрения перечисленные факторы с учетом тех закономерностей, которые приведены в данной статье.

Утечки водонесущих коммуникаций. Выше было показано, что существует синхронность

внутри- и межгодовых изменений УГВ с изменением скорости вращения Земли. Возникает следующий вопрос. Если допустить, что неравномерное вращение Земли — один из тех внешних факторов, который способен управлять динамикой УГВ, может ли он регулировать величину притока воды техногенного происхождения (аварийность водонесущих коммуникаций) и тем самым изменять УГВ города синхронно с изменением скорости вращения Земли? Положительный ответ на этот вопрос возможен лишь в случае, если допустить, что аварийность водонесущих коммуникаций по каким-то причинам зависит от изменения скорости вращения Земли. Теоретически можно представить такую модель. Известно, что для территории города характерно блоковое и микроблоковое строение верхней части геологического разреза [3, 6–7, 11–13]. Блоки и микроблоки испытывают дифференцированные вертикальные и, возможно, горизонтальные движения разного знака, изменяющие НДС пород. Если эти движения достаточно велики, а их частота зависит в том числе и от лунно-солнечного приливного воздействия (условия «гравитационного вибратора»), то можно предположить, что создаваемые ими напряжения, складываясь с напряжениями из-за неравномерности вращения Земли, рано или поздно будут способствовать разрушению водонесущих коммуникаций. В таком случае гипотеза о синхронности аварий на водонесущих коммуникациях и ускорений вращения Земли (далее — «гипотеза аварийности») не представляется такой уж нереальной. Гипотезу аварийности достоверно доказать можно лишь на количественном уровне, а такими данными мы не располагаем. Относительно подробный анализ гипотезы можно найти в работе [13]. Однако подчеркнем, что в контексте предлагаемой статьи вопрос о степени достоверности гипотезы аварийности принципиального значения не имеет. Если она верна, то это означает, что дифференцированные движения блоков и микроблоков, изменяя НДС пород, влияют не только на динамику гидравлической проницаемости структурно-тектонических дрен модели СТД, изменяющих отрицательную статью баланса грунтовых вод, но и дают определенный вклад в положительную статью баланса. Если же она неверна, то в балансе грунтовых вод ведущую роль играет только лишь механизм изменения гидравлической эффективности структурно-тектонических дрен. В любом случае принимаемая нами в качестве рабочей гипотезы модель СТД остается в силе. Возможно, дальнейшие более детальные исследования позволят оценить относительную роль этих двух рассматриваемых факторов.

Испарение и транспирация. Роль этих двух факторов в балансе атмосферных осадков и грунтовых вод рассмотрена выше. Возникает вопрос, какую роль эти факторы могут играть применительно к воде техногенной природы? Учитывая небольшую глубину расположения водонесущих коммуникаций, можно предположить, что испарение и транспирация способны изымать некоторую часть техногенных вод во время теплой половины года, когда температуры достаточно высоки для относительного увеличения испарения, а растительности достаточно много для усиления транспирации. Иными словами, что касается качественной оценки процессов, испарение и транспирация — и в случае атмосферных осадков, и в случае вод техногенного происхождения, — ограничивают приходные статьи баланса грунтовых вод приблизительно в течение полугода, т.е. «работают» согласованно во времени. Что же касается количественной стороны вопроса, здесь, по-видимому, можно говорить о принципиальном различии. В случае атмосферных осадков, как было показано выше, лишь десятая часть выпадающих осадков может участвовать в динамике грунтовых вод. В случае вод техногенного происхождения более вероятно предположить относительно небольшую роль испарения и транспирации:

по-видимому, значительная, если не подавляющая, часть техногенных вод имеет возможность принимать участие в годовой и межгодовой динамике УГВ. Очевидно также, что, с количественной точки зрения, данной вопрос нуждается в специальных исследованиях.

Гидрогеологические окна. Вопрос о количестве, размерах и расположении участков небольшой мощности плиоценовых красно-бурых глин (водоупорный горизонт) либо их отсутствия (гидрогеологические окна) рассматривался нами ранее [13, с. 255]. К сожалению, данных для построения кондиционной карты мощности красно-бурых (т.н. «скифских») глин по территории Одессы нет. О характеристиках гидрогеологических окон можно судить по геологическому разрезу вдоль профиля дренажной завесы, где скважины расположены в среднем в 20-ти метрах друг от друга, а протяженность разреза, как уже упоминалось, более 3-х км. Здесь важно отметить следующее. Мощность скифских глин изменяется чрезвычайно быстро (нередко со «скоростью» 1 м/10 м). Протяженность участков малой мощности скифских глин (гидрогеологических окон), как правило, не превышает первые десятки метров (наибольшее из достоверных гидрогеологических окон на профиле дренажной завесы имеет ширину около 75 метров). При таких сравнительно малых размерах окон и неравномерной и относительно редкой сети геологических скважин для территории города трудно восстановить достоверную картину их пространственного распределения. Однако в нашем случае принципиальный вопрос заключается не в этом. Для нас важнее иметь правильное представление о возможной роли гидрогеологических окон в интересующей нас динамике УГВ. Возможны две гипотезы: (1) гидравлическая эффективность гидрогеологических окон со временем не изменяется (в годовом и десятилетнем масштабе), поскольку неизменной остаются их размеры и мощность скифских глин в их пределах; (2) гидравлическая эффективность гидрогеологических окон со временем изменяется (в годовом и десятилетнем масштабе), поскольку они, вероятнее всего, некогда сформировались на основе дизъюнктивной решетки, образующей систему блоков и микроблоков с и дифференцированными движениями, реагирующими на вариации вращения Земли и лунно-солнечные приливы-отливы. Если принять вторую гипотезу, мы возвращаемся в контекст нашей модели STD, поскольку в этом случае нет принципиальной разницы между структурно-тектоническими дренами, представленными межблоковыми зонами повышенной проницаемости. Если же принять первую гипотезу, то фактор гидравлических окон просто надо будет исключить из рассмотрения, когда речь идет о закономерностях внутри- и межгодовой динамики УГВ; понятно, что в балансе грунтовых вод их роль остается немаловажной и ими пренебрегать нельзя. Таким образом, и в первом, и во втором случае учет фактора гидрогеологических окон не может отвергнуть модель STD. Поэтому мы приходим к заключению, что на сегодняшний день модель STD является наиболее обоснованной и перспективной рабочей гипотезой, которую следует разрабатывать в дальнейшем и искать пути ее практического использования при расчете баланса грунтовых вод на территории Одессы. Вне этой модели трудно объяснить наблюдаемую синхронность вариаций УГВ и скорости вращения Земли в годовом и десятилетнем масштабах.

Выводы

1. Атмосферные осадки не играют принципиальной роли в сезонной и межгодовой динамике УГВ на территории Одессы.
2. Имеет место хорошо выраженная синхронность динамики УГВ на территории города и скорости вращения Земли в сезонном и десятилетнем масштабах: УГВ повышается

на интервалах замедленного вращения Земли и понижается на интервалах ускоренного ее вращения.

3. Синхронный характер связи между УГВ и скоростью вращения Земли достаточно просто объясняется, если принять следующие допущения: (а) в геологическом отношении изученная территория Одессы характеризуется наличием системы разнопорядковых блоков и микроблоков, разделенных зонами повышенной вертикальной проницаемости, (б) блоки и микроблоки испытывают дифференцированные движения, изменяющие НДС пород верхней части земной коры и тем самым — гидравлическую эффективность межблоковых зон повышенной проницаемости; (в) межблоковые зоны повышенной проницаемости можно рассматривать как природные структурно-тектонические «дрены» с изменяющейся гидравлической эффективностью, через которые грунтовые воды четвертичного горизонта имеют возможность перетекать в нижележащий понтический водоносный горизонт; (г) динамика грунтовых вод изученной территории Одессы обусловлена главным образом величиной гидравлической эффективности межблоковых зон повышенной проницаемости, которая предопределяется изменением НДС массива пород, которое, в свою очередь, диктуется режимом скорости вращения Земли, поскольку ее неравномерный характер создает дополнительные напряжения в верхней зоне литосферы. Перечисленные положения (а-г) составляют сущность разрабатываемой нами модели структурно-тектонического дренажа, которая хорошо согласуется с представлениями о вертикальном водообмене через разделяющие и слабопроницаемые слои [2] и моделью гидрогеодеформационного поля Земли [1], предполагающей резкие пульсационные изменения в гидросфере в связи с перестройкой поля напряжений в литосфере.

4. Важным практическим следствием модели СТД является необходимость корректировки ряда важнейших характеристик гидрогеологического мониторинга и учета высокочастотной вариативности НДС массива пород. Анализ эти параметров важен даже в масштабе локальных инженерно-геологических изысканий под строительство отдельных зданий сооружений.

Литература

1. *Вартанян Г. С.* Гидрогеодеформационное поле Земли / Г. С. Вартанян, Г. В. Куликов // Докл. АН СССР, 1982. — Т. 262. — № 2. — С. 310–314.
2. *Водообмен* в гидрогеологических структурах Украины. Методы изучения водообмена / В. М. Шестопапов, А. Б. Ситников, В. И. Лялько [и др.]; отв. ред. В. М. Шестопапов. — Киев : Наук. думка, 1988. — 272 с.
3. *Воскобойников В. М.* Применение геодинамического анализа и метода обобщённых переменных для оценки и прогноза устойчивости оползневых склонов (на примере Северного Причерноморья) / В. М. Воскобойников, Т. В. Козлова // Инженерная геология. — 1992. — № 6. — С. 34–49.
4. *Гоголев М. И.* Гидрогеологические условия г. Одессы / М. И. Гоголев, Б. А. Корженевский, Б. В. Будкин, В. Л. Мельничук. — Киев, 1990. — 48 с.
5. *Зеленин И. В.* Закономерности внутригодовой изменчивости баланса грунтовых вод по лизиметрическим данным / И. В. Зеленин // Водные ресурсы. — Москва, 1993. — Т. 20. — № 2. — С. 180–185.
6. *Зелинский И. П.* Инженерные сооружения как инструмент изучения тектонической дискретности и активности геологической среды / И. П. Зелинский, Т. В. Козлова, Е. А. Черкез, В. И. Шмуратко // Труды 3-ей Украинской научно-технической конференции по механике грунтов и фундаментостроению. «Механика грунтов и фундаментостроение». — Одесса, 1997. — Т. 1. — С. 53–56.
7. *Зелинский И. П.* Причины деформаций здания Одесского театра оперы и балета / И. П. Зелинский, Т. В. Козлова, Е. А. Черкез, В. И. Шмуратко // Материалы науч.-мет. конф., посв. 85-летию В. Д. Ломтадзе. «Проблемы инженерной геологии». — С.-Петербург, 1998. — С. 103–106.
8. *Манк У.* Вращение Земли / У. Манк, Т. Макдональд. — Москва: Мир, 1964. — 384 с.
9. *Сидоренков Н. С.* Исследование роли атмосферы в возбуждении многолетних изменений скорости вращения Земли / Н. С. Сидоренков // Астрономический журнал. — 1979. — Т. 56. — Вып. 1. — С. 187–199.
10. *Сидоренков Н. С.* Нестабильность вращения Земли / Н. С. Сидоренков // Вестник Российской Академии Наук. — 2004. — Т. 74. — № 8. — С.701–715.

11. Черкез Е. А. Пространственно-временная изменчивость уровня грунтовых вод и ее влияние на степень локальной сейсмической опасности / Е. А. Черкез, Т. В. Козлова, В. И. Шмуратко // Зб. наук. праць. «Просторовий аналіз природних і техногенних ризиків в Україні». — Київ, 2009. — С. 85–91.
12. Черкез Е. А. Оползни северо-западного побережья Чёрного моря (моделирование, прогноз устойчивости склонов и оценка эффективности противооползневых мероприятий: Автореф. дисс. докт. геол.-мин. наук / Евгений Анатольевич Черкез. — Одесса, 1994. — 36 с.
13. Шмуратко В. И. Гравитационно-резонансный экзотектогенез / В. И. Шмуратко. — Одесса : Астропринт, 2001. — 332 с.
14. Шмуратко В. И. Межгодовые изменения уровня грунтовых вод на территории Одессы (по данным режимных наблюдений за период с 1972 по 2000 гг.) / В. И. Шмуратко // Доповіді НАН України. — 2002. — № 10. — С. 123–127.
15. Шмуратко В. И. Гравитационный резонанс и геологические процессы (теоретическое обоснование концепции и её практические приложения): автореф. дис. докт. геол. наук: спец. 04.00.01: Общая и региональная геология / Валерий Иванович Шмуратко. — Киев, 2005. — 39 с.

Є. А. Черкез, В. І. Шмуратко

кафедра інженерної геології і гідрогеології

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна

РОТАЦІЙНА ДИНАМІКА І РІВЕНЬ ЧЕТВЕРТИННОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ НА ТЕРИТОРІЇ ОДЕСИ

Резюме

Сучасна стратегія балансових розрахунків ґрунтових вод потребує суттєвого коригування. Головний її недолік полягає в тому, що вона практично ніяк не враховує роль геодинамічного фактору. Наш головний висновок полягає в тому, що спостережувані закономірності внутрішньо- і міжрічної динаміки рівня ґрунтових вод (РГВ) Одеси обумовлені не прибутковими статтями балансу (якими б вони не були), а видатковими статтями і управляються головним чином динамікою напружено-деформованого стану (НДС) структурно-тектонічних дрен на території міста.

Ключові слова: рівень ґрунтових вод, баланс ґрунтових вод.

E. A. Cherkez, V. I. Shmouratko

I. I. Mechnikov Odessa National University

Department of engineering geology and hydrogeology

Dvorianskaya, 2, Odessa, 65082, Ukraine

ROTATIONAL DYNAMICS AND THE LEVEL OF THE QUATERNARY AQUIFER IN ODESSA

Summary

The modern strategy of groundwater balance calculations needs to undergo a significant correction. Its main drawback is that it hardly takes into account the role of geodynamic factors. Our main conclusion is that the observed patterns of intra- and inter-annual dynamics of the groundwater level (GWL) in Odessa are caused by negative balance items rather than whichever positive ones. They are mostly influenced by the dynamics of the stress-strain state (SSS) of structural-tectonic drains in the city.

Key words: level of subsoil waters, balance of subsoil waters.