

В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Н. Н. Шешко

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИРОДНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «БЕЛОВЕЖСКАЯ ПУЩА»

На основе критериев, включающих частоту измерений уровня, продолжительность непрерывных измерений и плотность сети гидрогеологических скважин, представлены предложения по оптимизации системы наблюдений режима подземных вод.

Организация новых режимных зон в Национальном парке «Беловежская пуца» в условиях значительных природно-климатических изменений требует оптимизации существующей сети гидрогеологических скважин, а в случае необходимости бурения и соответствующего оборудования новых гидрогеологических скважин наблюдательной сети. Мониторинг подземных вод в пределах Национального парка осуществляется на 6 гидрогеологических постах, включающих более 70 скважин. Наблюдения за уровнем и балансом подземных вод должны проводиться согласно разработанным программам наблюдений, которые позволят объективно оценить состояние и тенденции изменений подземных вод.

Программа наблюдений предусматривает определенную частоту измерений, достаточную продолжительность непрерывных наблюдений, позволяющую с необходимой степенью точности оценить основные статистические параметры временных рядов и необходимую плотность (густоту) скважин на местности.

Оптимизация системы наблюдений может проводиться как для уже существующих систем наблюдений за уровнями грунтовых вод (УГВ) (изменение частоты наблюдений), так и для планируемой системы наблюдений.

Согласно Постановлению Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 14 июня 2006 г. № 39 «Об утверждении Инструкции о порядке проведения мониторинга подземных вод», замеры уровня и температуры подземных вод в наблюдательных скважинах производятся 3 раза в месяц с частотой (периодичностью) 10 дней [4].

Однако для такого уникального объекта как НП «Беловежская пуца» требуется разработка программы наблюдений, учитывающей все характерные особенности ее территории. Только в этом случае можно обеспечить оптимальное соотношение точности измерений и экономических затрат на достижение такой точности.

Выделяются два варианта решения данной задачи: 1) при фиксированном уровне затрат определяется максимальная точность измерений; 2) при заданной точности измерений вычисляются затраты на их проведение [6].

В качестве критерия оценки точности измерений можно использовать долю описанной дисперсии ряда за счет повышения частоты измерений, а для оценки затрат – функцию эффективности, показывающую насколько экономически обосновано получение дополнительной информации [8].

Оба показателя имеют различные области применения и размерности. Для решения оптимизационной задачи в таких случаях может использоваться геолого-экономическая целевая функция, соответствующая разности нормированной точности оценок показателей и нормированных затрат на достижение данной точности [7].

В качестве критериев, влияющих на точность оценок, как указывалось выше, могут выступать частота измерений уровней, продолжительность непрерывных измерений и плотность сети гидрогеологических скважин.

Оптимизация данных критериев зачастую проводится отдельно. Это связано с взаимозависимостью критериев, например частота измерений прямым образом влияет на экономические затраты для получения одного значения среднегодового УГВ. Поэтому для решения данной задачи предлагается использовать целевую функцию [3]. Максимизация либо минимизация целевой функции часто применяется при решении транспортно-экономических задач.

Оптимизацию программы наблюдений будет целесообразно проводить в следующей последовательности: 1) оптимизация частоты измерений; 2) оптимизация продолжительности наблюдений; 3) оптимизация плотности распределения наблюдательных скважин.

На каждом из этапов оптимизации ее результаты используются на последующих этапах, т.е. соблюдается институциональный принцип.

Для оценки точности при оптимизации частоты измерений использован критерий точности интерполяции при различном уровне дискретизации временного ряда:

$$E = 1 - \frac{\bar{S}}{\sigma}, \quad (1)$$

где E – точность интерполяции отсутствующих значений; \bar{S} – среднеквадратическая погрешность интерполяции, отражающая отклонение

интерполированных значений при различном уровне дискретизации; σ – среднее квадратическое отклонение исходного (полный ряд наблюдений) временного ряда; Параметр \bar{S} аналогичен оценке качества прогнозной модели (отклонение модельного ряда от исходного (наблюденого) ряда) [5]:

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z'_i)^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где Z_i – фактическое значение УГВ; Z'_i – восстановленные значения УГВ; n – число наблюдений.

Определение \bar{S} выполнялось по следующему алгоритму: 1) расчет УГВ на основе интерполяционных и экстраполяционных формул; 2) вычисление точности по формуле (1) с использованием исходного и модифицированного ряда; 3) возврат к операциям, выполняемым в п. 1 с увеличением количества исключенных значений, вплоть до принятого заранее предельного их количества.

Для упрощения анализа и сопоставления результатов рационально использовать относительные показатели вместо абсолютных значений точности и затрат. Для нормирования величин можно использовать различные подходы, т.е. нормировать на среднее значение либо на амплитуду. В нашем случае относительные показатели λ_E точности и λ_C затрат определялись по формулам:

$$\lambda_{E_i} = \frac{E_{\max} - E_i}{E_{\max} - E_{\min}}; \quad (3)$$

$$\lambda_{C_i} = \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (4)$$

где E_{\max} , E_{\min} и E_i – соответственно максимальная, минимальная и i -я точность; C_{\max} , C_{\min} и C_i – соответственно максимальные, минимальные и i -е затраты.

Целевая функция независимо от способа нормировки будет иметь вид $f|\lambda_E - \lambda_C|$.

В рамках настоящего исследования использованы результаты наблюдений по 52 скважинам из более чем 70 существующих с наибольшим периодом непрерывных наблюдений (30–40 лет).

Створы наблюдений за УГВ проходят по характерным ландшафтным участкам Национального парка. Глубина закладки скважин варьируется в широких пределах (2–140 м) в зависимости от гидрогеологических условий и назначения скважин.

Для оптимизации густоты наблюдательных скважин выбран существующий гидрогеологический створ, включающий в себя наиболее характерные элементы ландшафта природно-территориального комплекса «Беловежская пуща». Размер и положение выбранного створа изложены в работе [9].

Определение оптимального интервала дискретности проводилось для 6 гидрогеологических скважин. При этом использовался период наблюдений 4–5 лет. Дискретность временного исходного временного ряда по выбранным скважинам равна $t = 3$ сут. Постепенно увеличивая дискретность (согласно выше указанному алгоритму), вычислены матрицы $\{\lambda_E, \lambda_C, f|\lambda_E - \lambda_C|\}$

для каждой скважины, на основе которых построены графики (рис. 1). Из рисунка видно, что оптимальная дискретность измерений составляет для большинства гидрогеологических скважин $t = 12$ –18 сут., что не противоречит значениям, приведенным в [4]. Благодаря тому что функции точности и издержек возрастают с различной скоростью, можно определить оптимальное значение дискретности измерений. В тех случаях, когда названные скорости равны между собой, задача может быть решена определением затрат и дискретности при заданной точности.

В тех случаях, когда колебания уровня подземных вод имеют строго циклический характер, функция точности, а следовательно, и целевая функция будут иметь циклические колебания. При этом достаточно высокая точность измерений достигается при измерениях максимальных и минимальных уровней.

В результате определена оптимальная дискретность измерений ($t = 12$ –18 сут.) уровней в среднем для всего года. Однако для отдельных периодов, приуроченных к паводкам, половодьям и межени, значение дискретности измерений может отличаться и должно оцениваться отдельно.

На втором этапе проводится оптимизация продолжительности наблюдений за среднегодовыми значениями уровня. В отличие от дискретности наблюдений за суточными значениями, отражающими внутригодовой ход колебаний УГВ, продолжительность многолетних среднегодовых наблюдений влияет на точность оценок основных статистических моментов (среднегодового уровня, его вариация и асимметрия функции распределения).

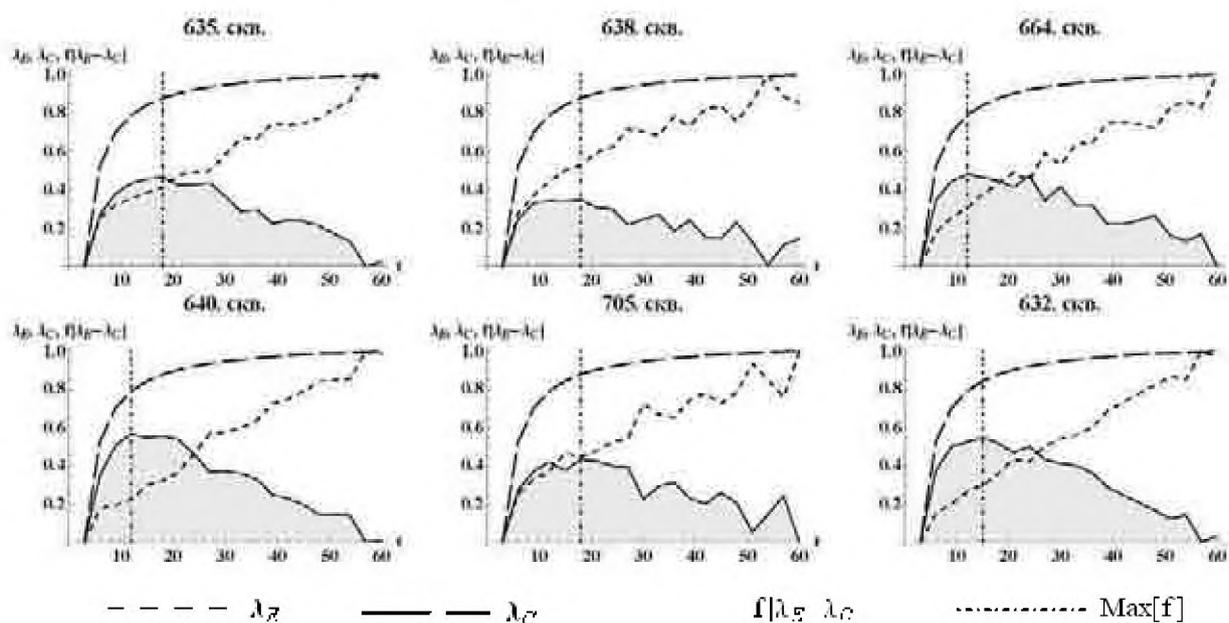


Рис. 1. Зависимость точности интерполяции, затрат на измерения и целевой функции от интервала дискретности измерений уровней подземных вод

На основе общей концепции наблюдений можно утверждать, что чем продолжительнее ряд наблюдений, тем он достоверней. Однако, возможна и такая постановка задачи: определить при какой продолжительности наблюдений выборочные значения с достаточной точностью для практических или иных целей описывают генеральную совокупность.

Таким образом, для оптимизации продолжительности измерений T был выбран показатель точности оценки \bar{Z} среднееголетнего УГВ. Для оценки достоверности различий среднееголетних значений УГВ был выбран критерий Стьюдента, который определяется по формуле (5), в случае равенства дисперсий, и по формуле (6), в случае различия дисперсий:

$$t_s = \frac{\bar{Z} - \bar{Z}'}{S \cdot \sqrt{1/n + 1/n'}}; \tag{5}$$

$$t_s = \frac{\bar{Z} - \bar{Z}'}{\sqrt{S^2/n + S'^2/n'}}; \tag{6}$$

где \bar{Z}, S, n – статистические параметры исходного ряда; \bar{Z}', S', n' – статистические параметры сокращенного ряда. При этом различие дисперсий оценивалось на основе критерия Фишера:

$$F = \frac{S'^2}{S^2} > F_{(\alpha), m, m'}, \tag{7}$$

где $F_{(\alpha), m, m'}$ – определяется табулированием функции плотности распределения Фишера с уровнем значимости α и степенями свободы отдельных выборок m и m' .

На основе ранее выполненных оценок частоты измерений для всей базы наблюдений по гидрогеологическим скважинам проведено определение оптимальной продолжительности наблюдений, результаты которого приведены на рис. 2.

При анализе данных результатов расчетов оптимальной продолжительности непрерывных наблюдений выявлено, что для большинства гидрогеологических скважин оптимальная продолжительность гидрогеологических наблюдений составляет в среднем 14 лет. На рис. 2 приведены результаты расчетов для наиболее характерных скважин. Полученное значение продолжительности наблюдений достаточное с данным уровнем оптимальности для достоверной экстраполяции значения среднегодовых уровней подземных вод при разработке прогнозных оценок.

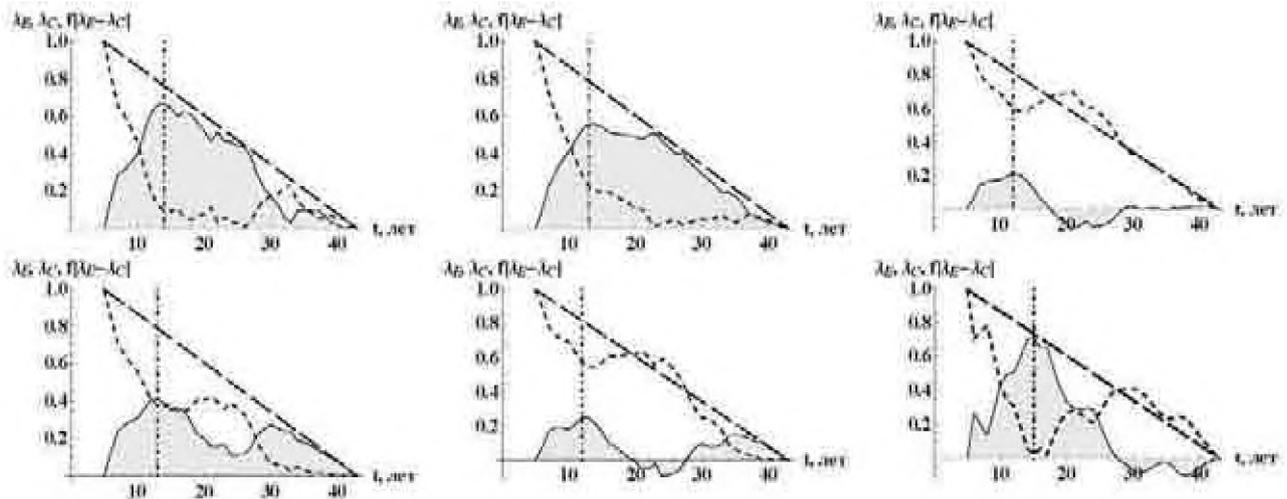


Рис. 2. Зависимость точности оценки среднемноголетнего уровня подземных вод, затрат на проведение наблюдений и целевой функции от продолжительности наблюдений

Оптимизация плотности распределения наблюдательных скважин по территории наиболее сложна, так как связана с большим количеством внешних факторов, таких как сложность рельефа, геологическое и гидрогеологическое строение, расположение водных объектов, уровень антропогенного воздействия и, наконец, целевое назначение наблюдательной сети.

В данном случае параметром для оптимизации густоты наблюдательной сети выбраны характеристики рельефа и геологического строения территории. В основу алгоритма оценки точности интерполяции УГВ в пространстве использована методика крайгинг-оценок [1, 3, 7]. В основу указанной методики положена зависимость полудисперсий смежных точек от расстояния между ними (рис. 3). При некотором значении интервала (лага) полудисперсия достигает максимума и корреляция соседних точек стремится к нулю.

Оптимизация густоты наблюдательных скважин начиналась при шаге (расстоянии между

скважинами) 10 м, который постепенно увеличивался. Затраты на увеличение числа наблюдательных скважин подсчитывались, исходя из интервала дискретности измерений 15 сут. и продолжительности наблюдений 14 лет, т. е. величин, полученных на первых двух этапах оптимизации. Как и ранее, точность (ошибка) и затраты на ее достижение выражались в относительных величинах по формулам (3) и (4).

На рис. 4. показано влияние расстояния между наблюдательными скважинами на точность крайгинг-оценок среднегодовых уровней и затраты на их увеличение, а также вид целевой функции. При этом, как и ранее, функции λ_E и λ_C убывают с различной скоростью, а максимум целевой функции наблюдается при расстоянии между скважинами в 4500 м. Это значение, осредненное для всего выбранного створа, на отдельных участках (вблизи водоемов и водотоков может) может быть уменьшено.

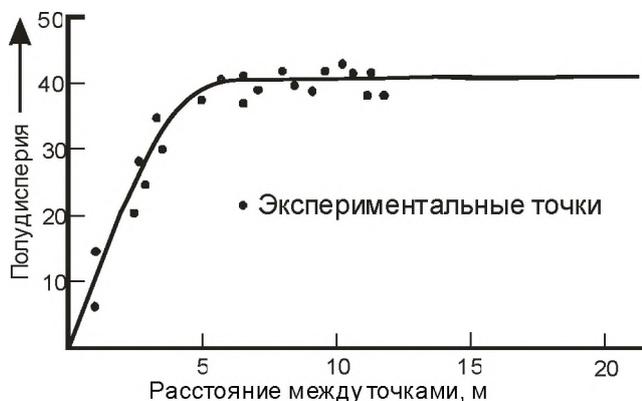


Рис. 3. Вариограмма [7]

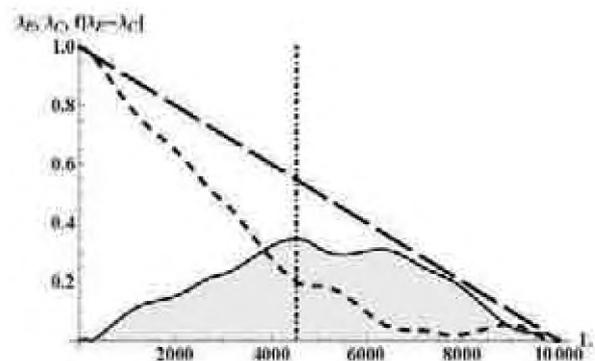


Рис. 4. Зависимость точности крайгинг-оценок среднегодовых уровней и затрат на развитие сети (расстояние, м)

Получены оптимальные, с точки зрения точности наблюдений и затрат на ее достижение. значения частоты (дискретности) наблюдений. Они составляют 12–18 сут., продолжительности наблюдений – 14 лет и расстояния между гидрогеологическими скважинами – 4500 м. Для Национального парка «Беловежская пуща» при расчете затрат учитывались только переменные издержки, а постоянные издержки принимались равными нулю. Учет постоянных издержек привел бы к незначительному смещению максимума целевой функции, что компенсировалось бы ос-

реднением результатов по нескольким временным рядам. Полученные выше оптимальные значения могут быть использованы при модернизации существующей или при проектировании новой наблюдательной сети. Применительно к особо охраняемым природным территориям возможна компенсация части затрат на измерения (максимум целевой функции сместится влево) в связи с природно-экологической значимостью объекта. Это позволит уменьшить дискретность измерений и интервал между наблюдательными скважинами.

Литература

1. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд. Л., 1980.
2. Ефре́менко А. В., Семенов С. М. Практическая геостатистика // Тр. Всесоюз. сем. по геостатистике. М., 1991. С. 67–72.
3. Ефре́менко А. В., Ковалевский В. С., Семенов С. М. К оценке оптимального комплекса наблюдений за режимом подземных вод // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 5. С. 529–533.
4. Инструкция о порядке проведения геологического изучения участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых. Утв. Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 14.06.2006 – текст по состоянию на 19.01.2007 г. Минск, 2006.
5. Коноплянец А. А., Семенов С. М. Изучение, прогноз и картирование режима подземных вод. М., 1979.
6. Усиков Т. Ю. Достоверность геологоразведочной информации. М., 1988.
7. DeMers N. Michael Fundamentals geographic information systems // New Mexico: John Wiley & Sons, 1997.
8. Rouhani S. Variance reduction analysis // Water Resour. Res. 1985. V. 21, № 6. P. 837–846.
9. Wołczek A. A., Szeszko N. N., Kamłacz W. I. Stan systemów melioracyjnych strefy ochronnej Parku Narodowego Białowieża i ocena ich wpływu na warunki wodne terenów przyległych // Gospodarka wodna. 2009. N 7(727). P. 282–286.

**Институт природопользования НАН Беларуси,
Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси**

В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Н. Н. Шешко

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИРОДНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «БЕЛОВЕЖСКАЯ ПУЩА»

Рассмотрены вопросы оптимизации системы наблюдений для существующих и планируемых наблюдений за уровнем грунтовых вод (УГВ). Для решения оптимизационной задачи использованы геолого-экономическая целевая функция, соответствующая разности нормированной точности оценок показателей и нормированных затрат на достижение данной точности. В качестве критериев, влияющих на точность оценок, использованы частота измерений уровня, продолжительность непрерывных наблюдений и плотности сети гидрогеологических скважин. Получены оптимальные значения частот (дискретности) наблюдений. Они могут быть использованы при модернизации существующей или проектировании новых сетей наблюдений за уровнем грунтовых вод.

V. F. Loginov, A. A. Volchek, N. N. Sheshko

OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF UNDERGROUND WATERS OBSERVATION MODE OF NATURE-TERRITORIAL COMPLEX "BELOVEZHSKAYA PUSHCHA"

Issues of optimization of observation system for present and planned observations for ground waters level (GWL) have been discussed. To solve the optimizing task a geology- economical target function, corresponding to the difference of normalized exactness of the evaluations of indices and normalized costs to obtain the named exactness have been used. As criteria, affecting the assessments exactness, the frequency of level measurement, duration of continuous observations and densities of net of hydrogeological holes have been used. Optimal values of frequencies of observations were gained. They may be applied to update an existing or projected new ground waters level observation nets.