

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУРЬЕ И ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН

Лукин А.А.

Томский политехнический университет

Исследовано воздействие работы эксплуатационных скважин на колебание напоров в наблюдательных скважинах и выделение частотных составляющих техногенного и природного колебаний в спектре. Показаны возможность использования Фурье-анализа и вейвлет-преобразования, а так же сравнительный анализ для оценки гидрогеодинамического влияния режима работы эксплуатационных скважин.

Постановка задачи

В настоящее время основным методом оценки гидрогеодинамического влияния скважин является численное гидродинамическое моделирование на персональных компьютерах с использованием специализированных программных комплексов [1]. Отметим сложности и недостатки при использовании моделирования. Это трудоемкость в создании гидрогеодинамических моделей, учитывающих всю сложность геологического разреза и других условий; не изучено влияние неравномерно прерывистой работы скважин на колебательный режим напоров, соответственно не разработаны критерии амплитудного воздействия и методика вычленения техногенных составляющих в общей системе всех природных факторов, влияющих на гидрогеодинамический режим подземных вод.

В статье предложены новый подход, основанный на использовании Фурье-анализа в амплитудно-частотном варианте и дискретного вейвлет-преобразования для разделения и выделения частотных составляющих технологической работы эксплуатационных скважин и природных колебаний.

Объектом изучения является полигон захоронения промышленных отходов Сибирского химического комбината (СХК), расположенный на правом берегу р. Томь, в 30-40 км южнее от места ее впадения в р. Обь. Выбор объекта связан как чисто с практической точки – полигон имеет значительное количество контрольных и наблюдательных скважин, так и с актуальностью региональной экологической проблемы – оценка условий взаимодействия полигона захоронения жидких промышленных отходов СХК и Томского водозабора подземных вод.

Методика расчетов

Фурье-анализ. Как известно [2], любой сигнал можно представить совокупностью гармонических составляющих (гармоник) – в виде ряда Фурье. Для точного представления сигнала требуется бесконечное число гармоник. Совокупность этих гармоник называется спектром.

Разложение наблюдаемого сигнала или поля на различные частотные составляющие, что и представляет сущность спектрального анализа, уже само по себе дает много информации о структуре сигнала или поля. Важно подчеркнуть применимость спектрального анализа для описания свойств геофизических сигналов и полей, заданных как детерминированными, так и случайными функциями.

Исходным сигналом были материалы замеров гидростатических уровней в наблюдательных и контрольных скважинах, вскрывающих II технологический гори-

зонт. В нашем случае наблюдения дискретны, и частота их составляет один замер в месяц. Для расчета спектра чистого технологического режима работы полигона исходным материалом являлась модельная кривая скважины Н-18. Так как модельные значения напоров были более частыми и неравномерными по времени, то они проводились в один вид с временными значениями наблюдательных скважин.

Каждый спектр состоит из двух частей: действительной – A и мнимой – B . Рассчитать эти части спектра сигнала можно по формулам [4]:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \cos\left(\frac{2\pi ni}{N}\right), \quad B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \sin\left(\frac{2\pi ni}{N}\right).$$

В этих выражениях F_i – значение функции в i -й точке; n – номер гармоники, изменяющийся от 1 до $N/2$, N – общее количество значений функции.

После получения значений действительной и мнимой частей можно рассчитать непосредственно амплитудно-частотные спектры сигнала:

$$S = \sqrt{A^2 + B^2}.$$

Дискретное вейвлет-преобразование. Основой при построении вейвлетных разложений, связанных с равномерной сеткой, является кратно-масштабное уравнение [3]:

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k n_k \varphi(2t - k).$$

Основной прием решения уравнения – применение преобразования Фурье к тождеству; это приводит к представлению образа Фурье функции φ в виде бесконечного произведения, откуда можно извлечь ее значения в двоичных точках вещественной оси, то есть в точках, являющихся обыкновенными дробями со знаменателем 2^s , где s – целое число. Таким образом, для нахождения значений коэффициентов вейвлет-фильтра длиной 4, мы должны решить систему из 4 алгебраических уравнений ($c_k = h_k$):

$$\begin{cases} c_0^2 + c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1 \\ c_2 c_0 + c_3 c_1 = 0 \\ c_3 - c_2 + c_1 - c_0 = 0 \\ 0c_3 - 1c_2 + 2c_1 - 3c_0 = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{условия ортонормальности} \\ \\ \text{нулевые моменты} \end{array}$$

Если остальные коэффициенты c_k положить равными нулю, то получается вейвлет, называемый 4-вейвлетом Добеши [3]. Согласно методике, вектор данных x и вектор вейвлет-спектра w должны иметь ровно $N = 2^{n_0}$ элементов (n_0 – целое число). Данное условие было выполнено путем линейной интерполяции исходного сигнала до 128 точек. Расчет дискретного преобразования проводился в среде MathCad.

Анализ результатов

Анализ проводился путем сопоставления спектров и спектрограмм изменения напора в скважинах с выделением совпадающих гармоник. Весь первичный материал брался в одном временном интервале с 01.01.2005 по 01.01.2009 (4 года) и с равномерной дискретностью. Поскольку при наложении спектров локальные максимумы совпадают, можно сделать вывод, что обуславливающие их гармоники имеют единый источник возбуждения. Чтобы исключить случайные совпадения гармоник

спектров, особенно на высоких частотах, проводился комплексный анализ спектров в равноудаленных скважинах данного типа.

С более подробный анализом результатов можно ознакомиться в ранее опубликованных статьях по Фурье анализу [4] и по дискретному вейвлет-преобразованию [5]. В данной же работе уделим большее внимание на сравнительный анализ данных методов, эффективность их при решении задач обоснования границ гидродинамического влияния и разделение техногенных и природных колебаний.

Для выделения технологической составляющей сопоставлялись амплитудно-частотные спектры всех контрольных скважин (А-4, Г-9 и др.) и эталонный спектр технологического режима работы полигона. Выделяются две основных гармоники 4 и 12 (рис. 1), соответствующие технологическому режиму работы полигона [4]. Интерпретация спектра в интервале $n > 15$ проводилась с большой осторожностью, т. к. Фурье-анализ имеет ограничения на высоких частотах, на которых в спектрах может проявиться нестационарный режим фильтрации.

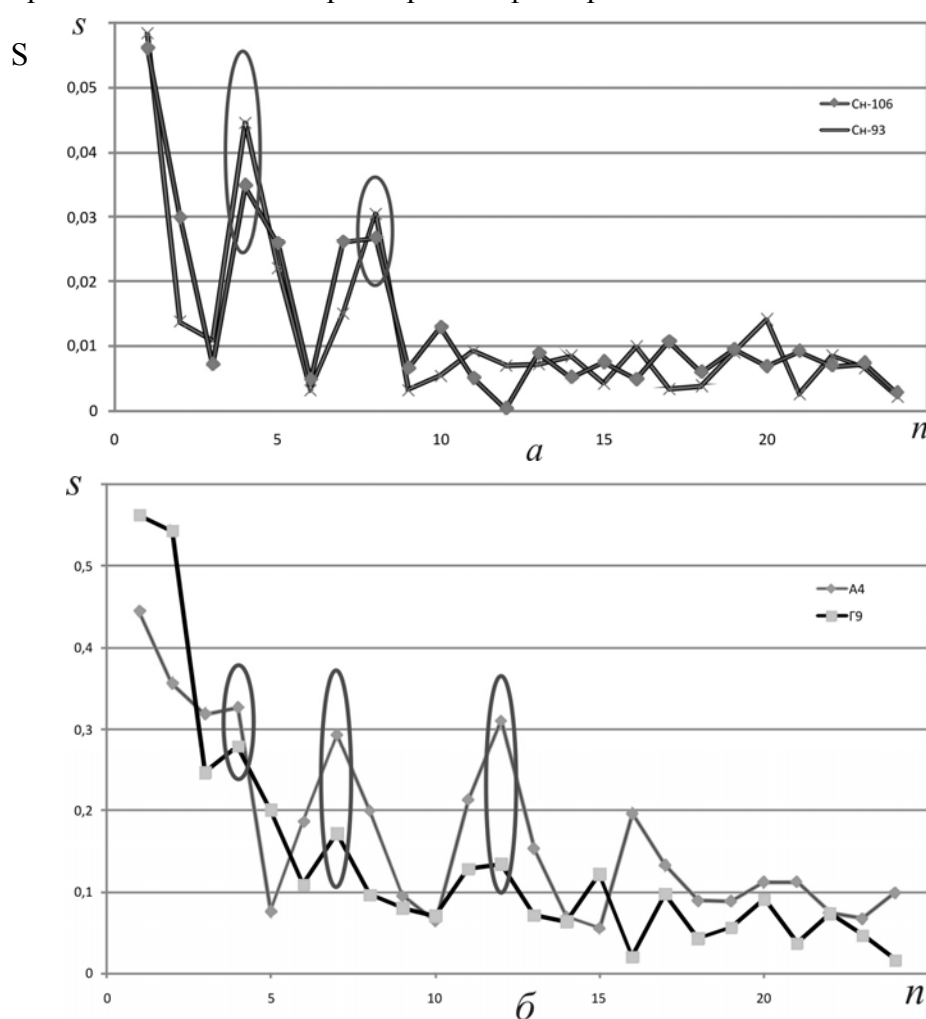


Рис. 1. Амплитудно-частотные спектры колебания напоров в наблюдательных скважинах Сн-106 и Сн-93 (а) и в контрольных скважинах А4 и Г9 (б)

При выделении частот природного спектра в первую очередь использовались спектры колебаний в наблюдательных скважин, Сн-106 и Сн-93 (рис. 1), расположенных соответственно на расстоянии 8 и 9 км от полигона.

На полученных спектрограммах колебаний напоров скважин можно увидеть ряд закономерностей [5]. Спектрограммы колебаний напоров скважин, значительно удаленных от полигона Сн-93, Сн-106 (рис. 2 а, б) схожи между собой: максимальные значения обоих расположены в начальных координатах спектров 5го семейства, минимумы – в интервалах 50- и срединных (50–65; 85–100) координатах спектра 3-го семейства. Схожесть этих спектрограмм, как и их спектров (рис. 1, а) говорит о том, что в данных скважинах доминируют природные колебания.

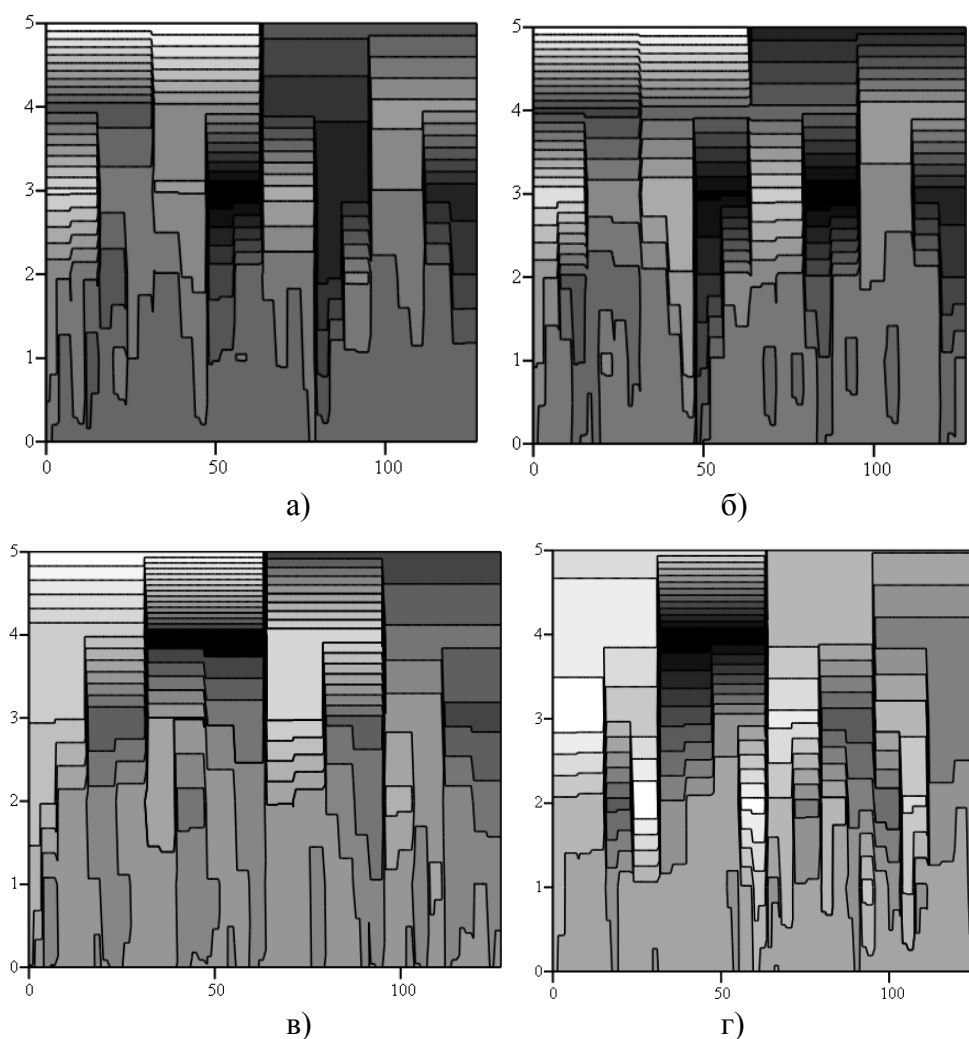


Рис. 2. Спектрограммы гидростатических колебаний скважин Сн-93(а), Сн-106(б), Г9(в), А4(г)

Скважина Г-9, спектрограмма которой представлена на рис. 2, в, и скважина А-4 (рис. 2, г), которые находится в зоне влияния полигона, их объединяет расположение минимума спектрограммы и нарастание в начальных координатах спектров. Так же на спектрограммах преобладают более светлые тона, это говорит о повышенных значениях спектров; зон максимума на спектрограмме не одна, как было до этого, а три. Эти особенности подтверждают то, что в данных скважине наблюдаются техногенные колебания.

Выводы

Методами Фурье-анализа и вейвлет-преобразования дискретных сигналов проведено исследование гидростатического режима скважин на полигоне ЖРО Сибирского химического комбината. Исследовано воздействие работы эксплуатационных скважин на колебание напоров в наблюдательных скважинах. В амплитудно-частотном спектре и в спектрограммах колебаний напора выделены частотные составляющие техногенного и природного происхождения.

В ходе сравнительного анализа эффективности двух методов выявлены следующие особенности:

1. Спектрограммы, полученные в результате вейвлет-преобразования колебания напоров в скважинах имеют более детальный вид по сравнению с амплитудно-частотными спектрами, что позволит находить больше особенностей при анализе результатов.

2. По спектрограммам затруднительно осуществить переход к абсолютным значениям периодов колебаний, что делает проблематичным растолкование аномальных областей.

3. Требуется меньше временных и вычислительных затрат для построения амплитудно-частотных спектров, в связи с чем Фурье-анализа можно отнести к экспресс-методам.

Литература

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТПУ. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 346–365.

2. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.

3. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 37 с.

4. Лукин Ал. А. Оценка гидрогеодинамического влияния режима эксплуатации скважин на основе статистических функций // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 146–151.

5. Чубаров Д. Л. Применение дискретного вейвлет-преобразования для оценки гидрогеодинамического влияния режима эксплуатации скважин // XXXVII Малышевские чтения: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 15 Мая 2013. Т. 2. – М.: Изд-во РГГУ, 2013. – С. 414–418.