

перед нефтяниками, как при оценке извлекаемых запасов, так и при моделировании процесса добычи нефти, т. к. позволяет определить более достоверно коэффициент извлечения нефти, который определяется как произведение коэффициента вытеснения на коэффициент охвата пласта:  $K_v K_{om} K_{on}$ .

Коэффициент  $K_v$  предлагается определять в условиях большой площади охвата пласта, при естественном давлении его залегаания, а  $K_{om}$  — коэффициент охвата по толщине и  $K_{on}$  — коэффициент охвата по площади, зависят от плотности сетки скважин и способов первичного и вторичного вскрытия пласта. Расчеты по скважине № 2, приведенные в качестве примера, были проведены для каждого режима, чтобы показать их достаточную точность, даже если скважина была исследована на двух режимах, между которыми зафиксировано падение пластового давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чарный И.А. Подземная гидродинамика. — М.: Гостоптехиздат, 1963. — 312 с.
2. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследования нефтяных и газовых скважин. — М.: Недра, 1984. — 272 с.
3. Ивлев Д.А., Князькова Л.Ю., Крылов О.В., Пешков В.Е. и др. Гидродинамические исследования малодобитных скважин при их пуске в работу при монотонном изменении режима работы // Геолого-промысловые исследования скважин и пластов: Матер. научно-практ. конф. — Тюмень, 2002. — С. 88–104.

#### Выводы

1. Предложен метод определения коэффициента вытеснения нефти из пласта при естественном режиме эксплуатации залежи, дано его теоретическое обоснование.
2. Показано, что максимальное отклонение коэффициента вытеснения, определенного по результатам гидродинамических исследований, составляет 0,007, т. е. погрешность метода при 3-х разовом определении параметра на одной скважине не превышает 0,7 %, что приемлемо при разработке месторождения и определения коэффициента извлечения нефти при подсчете запасов.
3. Изохронный метод гидродинамических исследований скважин рекомендуется применять при геолого-разведочных работах на нефтяных и газовых месторождениях.
4. Программный комплекс: «Балансгидродинамик». Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009612364, заявл. 24.03.09; зарег. в реестре 12.05.09; патентодержатель ООО «Сибнефтегазинновация».
5. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин / под ред. Г.А. Зотова, З.С. Алиева. — М.: Недра, 1980. — 301 с.

Поступила 18.07.2011 г.

УДК 504.064.2.001.18:550.8.015

## ОЦЕНКА ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Ал.А. Лукин

Томский политехнический университет  
E-mail: Lukin@tpu.ru

*Исследовано воздействие работы эксплуатационных скважин полигона захоронения промышленных отходов Сибирского химического комбината на колебание напоров в наблюдательных скважинах и выделение частотных составляющих техногенного и природного колебаний в спектре. Показана возможность использования функции взаимной корреляции и Фурье-анализа для оценки гидрогеодинамического влияния режима работы эксплуатационных скважин.*

#### Ключевые слова:

*Гидрогеодинамическое влияние, скважины, колебание напоров, техногенные и природные колебания, Фурье-анализ, функция взаимной корреляции, полигон захоронения.*

#### Key words:

*Hydrodynamic impact, well, pressures oscillation, manmade and natural oscillation, Fourier-analysis, cross-correlation function, landfill.*

Основным методом оценки гидрогеодинамического влияния скважин является численное гидродинамическое моделирование на персональных компьютерах с использованием специализированных программных комплексов [1]. В программах реализован алгоритм решения дифференциального уравнения нестационарной плановой фильтра-

ции методом конечных разностей. Существующие программы позволяют решать ряд задач, относящихся к теме статьи: численное определение гидростатического напора в любой точке пространства, возможность учета геологического строения и других начальных и граничных условий, в том числе неравномерный режим работ скважин

за весь период работы той или иной геотехнической системы. Отметим сложности и нерешенные задачи: трудоемкость в создании гидрогеодинамических моделей, учитывающих всю сложность геологического разреза и других условий; не изученность влияния неравномерно прерывистой работы скважин на колебательный режим напоров, соответственно не разработаны критерии амплитудного воздействия (хотя намечены некоторые подходы [2]) и методика вычленения техногенных составляющих в общей системе всех природных факторов, влияющих на гидрогеодинамический режим подземных вод.

В статье предложен новый подход, основанный на использовании статистической функции взаимной корреляции и Фурье-анализа в амплитудно-частотном варианте для разделения и выделения частотных составляющих технологической работы эксплуатационных скважин и природных колебаний. В настоящее время в гидрогеологии методы изучения режима подземных вод используются только для анализа и прогноза природных колебаний уровней, цикличностей, ритмов различной продолжительности [3].

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.

### 1. Выявление технологического воздействия

Основной задачей при использовании взаимно корреляционной функции (ВКФ) является выявление влияния и количественная оценка технологиче-

ского режима работы полигонов СХК на колебательный режим напоров в наблюдательных скважинах.

ВКФ представляет собой оценку корреляционных свойств двух функций [4]. В нашем случае, функции технологической работы типовой нагнетательной скважины полигона и функции изменения гидростатических напоров в наблюдательной скважине.

Вычисление ВКФ производится по формуле:

$$B(m) = \frac{1}{n - |m|} \sum_{i=1}^{n-|m|} (f_{1i} - \bar{f}_1)(f_{2i} - \bar{f}_2), \quad (*)$$

где  $m=0; \pm\Delta; \pm 2\Delta; \dots; \pm M\Delta$ ;  $n$  – число точек для каждой реализации;  $f_{1i}$  и  $f_{2i}$  –  $i$ -е значение первой и второй функций;  $\bar{f}_1, \bar{f}_2$  – их среднее значение.

#### Методика расчета:

Исходными данными для расчетов являются полевые данные замеров гидростатических уровней в наблюдательных (Сн-84, Сн-93, Сн-98, Сн-101, Сн-106) и контрольных (Г9) скважинах, вскрывающих II технологический горизонт. Интервал времени ограничен 4 годами, с 01 января 2005 по 31 декабря 2008 гг., дискретность записи – один раз в месяц.

В качестве эталонного сигнала технологической работы полигона использовалась модельная кривая изменения напоров в нагнетательной скважине Н-18, режим которой является типичным для работы всего полигона. Дискретность значений и интервал времени приведен в соответствии с предыдущими данными.

Далее расчет проводился по формуле (\*), результаты расчета представлены в виде графика  $B(m)$ , рис. 1.

#### Анализ результатов

В результате выполненных расчетов и построений уверенно выявились скважины, находящиеся под воздействием технологического режима рабо-

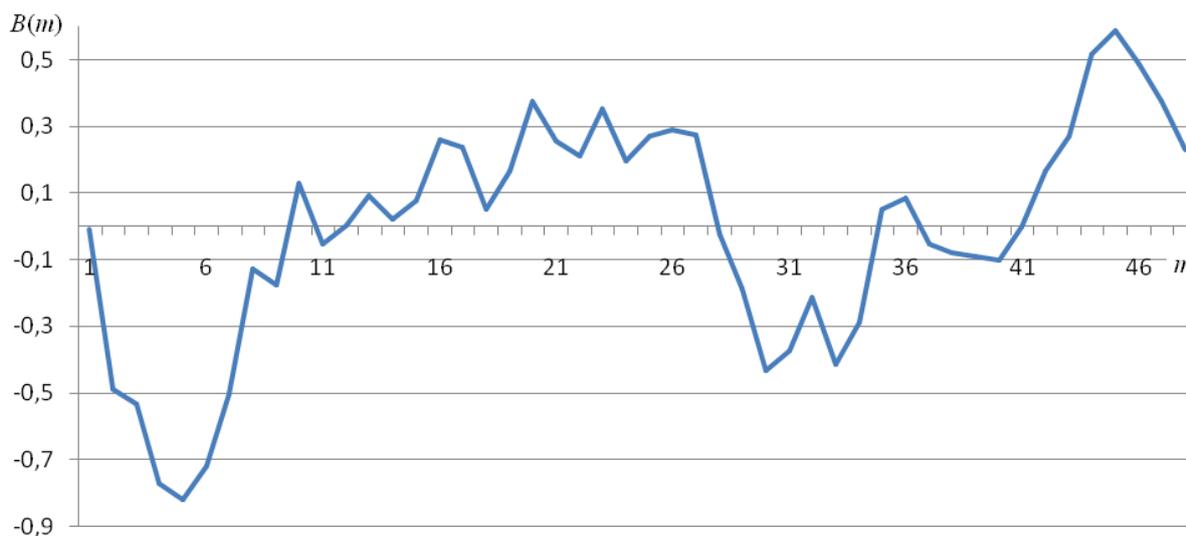


Рис. 1. График ВКФ изменения гидростатических уровней в скважине Г-9 и технологического режима работы полигона

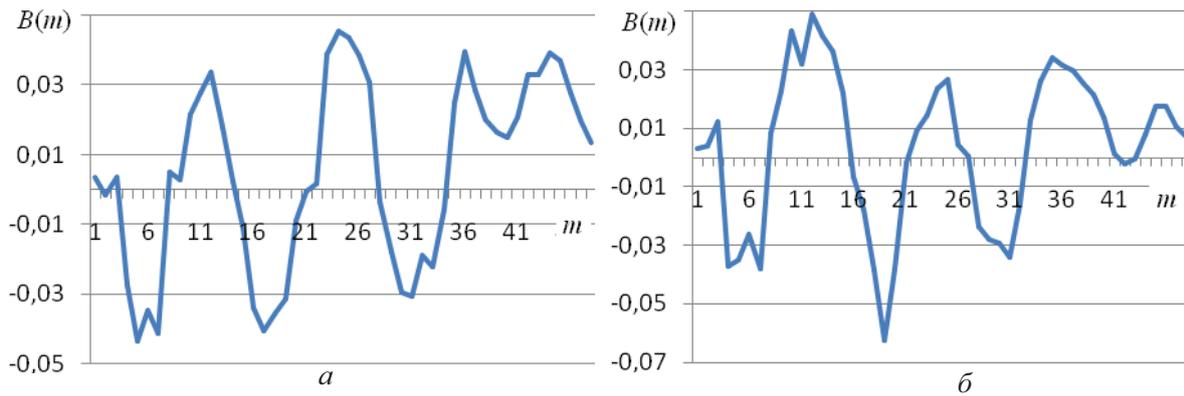


Рис. 2. График ВКФ изменения гидростатических уровней в скважине Сн-84 (а) и Сн-106 (б) и технологического режима работы полигона

ты полигона (Г9, А4 и др. контрольные скважины), и без существенного влияния (Сн-84, Сн-93, Сн-98, Сн-101, Сн-106 – наблюдательные скважины единой системы контроля недр).

На рис. 1 приведен график ВКФ, показывающий степень корреляции изменения гидростатических уровней в контрольной скважине Г-9 и технологического режима работы полигона.

Как видно из рисунка, коэффициент корреляции достигает 80 %. Это свидетельствует о доминирующем влиянии технологического режима работы полигона на скважину Г-9 на фоне природных источников влияния. Из графика видно, что максимальное значение корреляции наблюдается при  $m=5$ , что соответствует моменту установления квазистационарного режима воздействия нагнетательных скважин на скважину Г-9.

Далее рассмотрим, какой вид имеет ВКФ для наблюдательных скважин единой системы контроля недр, расположенных на значительном удалении от полигона. В качестве примера на рис. 2 приведены графики ВКФ для скважин Сн-84 (4 км от полигона) и Сн-106 (9,3 км от полигона).

Из рис. 2 видно, что в обоих случаях значения ВКФ не превышают 4...6 %. Это свидетельствует об отсутствии влияния режима работы полигона на эти скважины.

## 2. Выделение частотных составляющих технологического и природного колебаний

Как известно [5], любой сигнал можно представить совокупностью гармонических составляющих (гармоник) – в виде ряда Фурье. Для точного представления сигнала требуется бесконечное число гармоник. Совокупность этих весов 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 [4]. Важно подчеркнуть применимость спектрального анализа для описания свойств геофизических сигналов и полей, заданных как детерминированными, так и случайными функциями.

В настоящее время спектральный анализ объединяет методы анализа Фурье и статистического анализа временных, в том числе любых дискретных, последовательностей наблюдаемых значений. Отметим, что при обработке данных конечной длительности, к которым относятся все геофизические наблюдения, спектральный анализ оказывается более предпочтительным.

Решалось две задачи:

1. Нахождение спектров колебания напоров в наблюдательных, контрольных и нагнетательных скважинах.
2. Анализ и выделение в спектрах натуральных наблюдений технологического режима работы полигона и природной составляющей.

### Методика расчетов

Исходным сигналом были материалы замеров гидростатических уровней в наблюдательных и контрольных скважинах, вскрывающих II технологический горизонт. 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:

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

**Анализ результатов и выводы**

Анализ проводился путем сопоставления спектров 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.

Для выделения технологической составляющей сопоставлялись амплитудно-частотные спектры всех контрольных скважин (А-4, Г-9 и др.) и эталонный спектр технологического режима работы полигона, рис. 3.

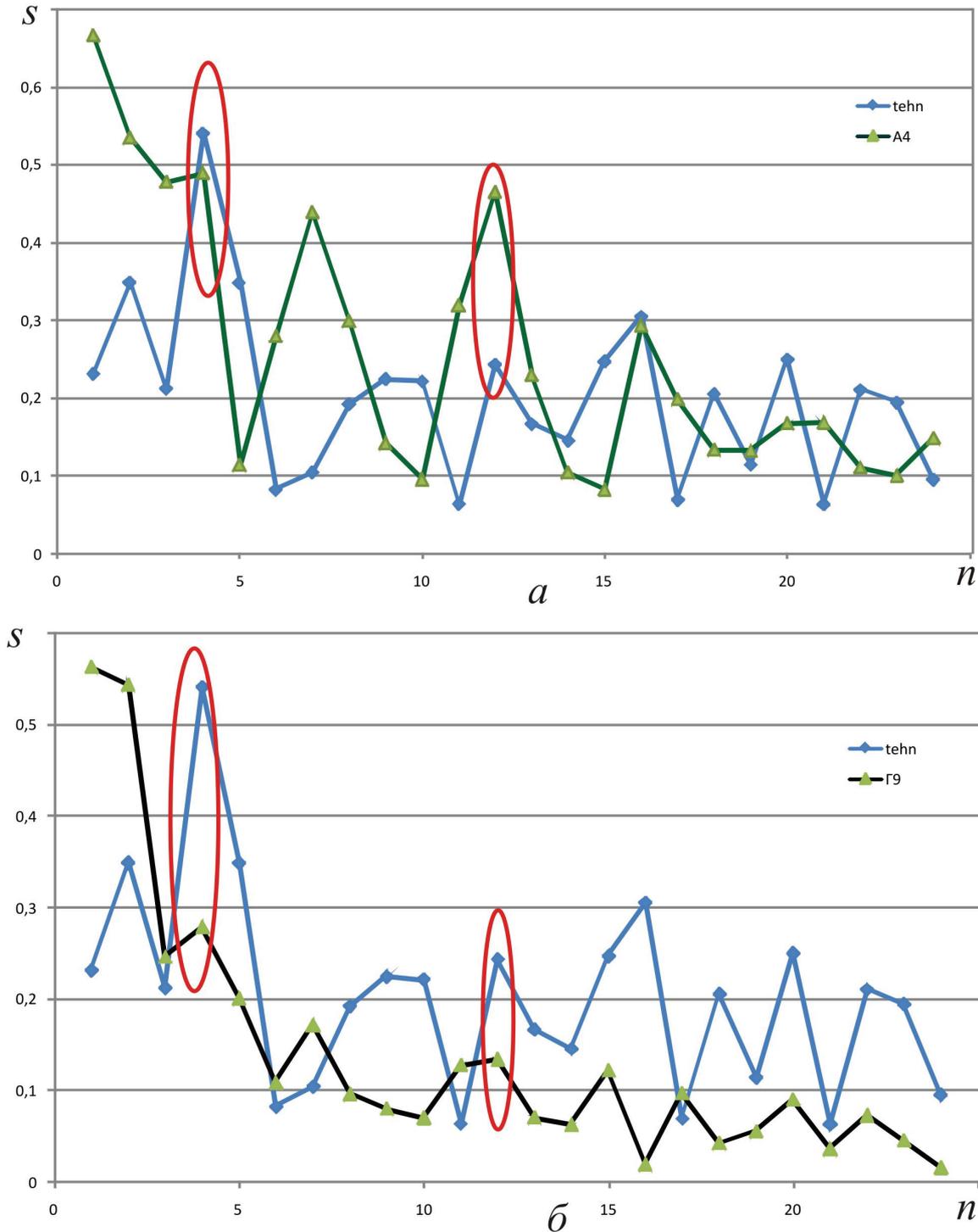
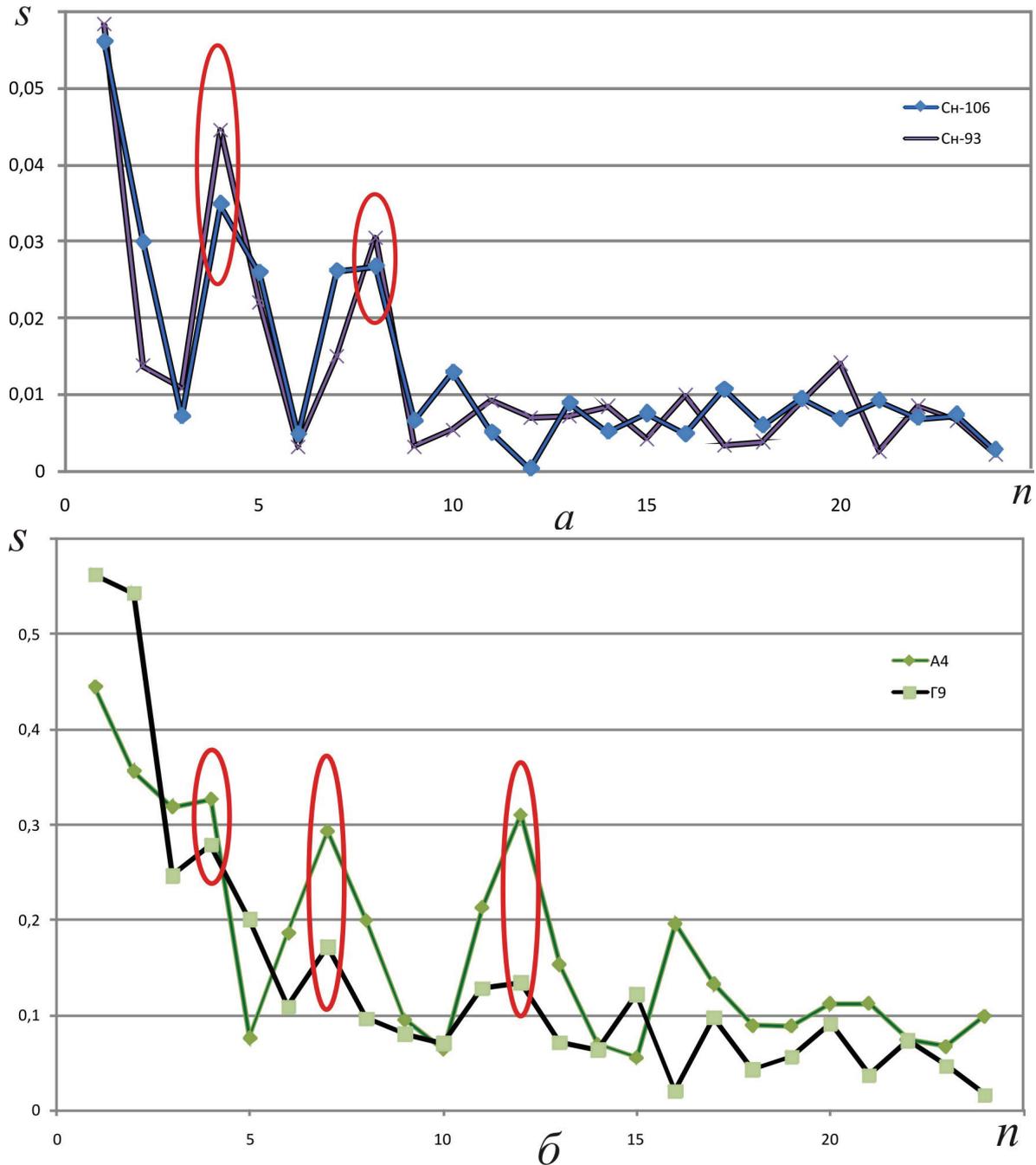


Рис. 3. Амплитудно-частотные спектры эталонного технологического режима и скв. А4 (а) и Г9 (б)



**Рис. 4.** Амплитудно-частотные спектры колебания напоров в наблюдательных скважинах Сн-106 и Сн-93 (а) и в контрольных скважинах А4 и Г9 (б)

Как видно из рис. 3, выделяются две основных гармоники, 4 и 12. Именно эти гармоники соответствуют технологическому режиму работы полигона. 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.

При выделении частот природного спектра в первую очередь использовались спектры колебаний в наблюдательных скважин, Сн-106 и Сн-93, расположенных соответственно на расстоянии

8 и 9 км от полигона. Ранее [2] было обосновано, что на колебательный режим этих скважин не оказывает влияние режим эксплуатационных скважин полигона. Поэтому спектры колебания напоров в этих скважинах принимаются за спектры природных колебаний. На рис. 4, а, показаны совмещенные спектры колебания напоров в наблюдательных скважинах Сн-106 и Сн-93.

Из рисунка видно, что спектры для этих скважин имеют очень хорошую сходимость на низких частотах. Выделяются два максимума в районе 4-й и 7-й гармоник, они соответствуют периодам в 12 и 6 мес.

Такие периоды объясняются сезонными колебаниями в гидрогеодинамическом режимах подземных вод.

Как видно, природные и техногенные спектры имеют общую гармонику — 4, поэтому наличие этой гармоники не является достаточным условием для разделения природных или техногенных воздействий. В спектре техногенных колебаний наличие 4-й гармоники объясняется сезонными факторами, влияющими на объем производства продукции комбинатом.

Далее рассмотрим спектры на рис. 4, б, в контрольных скважинах А4 и Г9, которые находятся под влиянием работы полигона и испытывают также природные колебания.

Как и следовало ожидать, на спектрах выделяются все три гармоники: 7-я — соответствует природным колебаниям, 12-я — гармоника технологического колебания и 4-я — общая гармоника. При этом 4-я гармоника, в связи с наложением, выделяется не так ярко.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия Томского политехнического университета. — 2002. — Т. 305. — № 6. — С. 346–365.
2. Лукин А.А., Букаты М.Б., Зубков А.А., Гусев Е.В., Лукин Ал.Ан. Выявление и использование волновых характеристик в напорном поле при обосновании границ гидродинамического влияния геотехнических систем // Известия вузов. Геология и разведка. — 2008. — № 1. — С. 35–41.

#### Выводы

Исследовано воздействие работы эксплуатационных скважин на колебание напоров в наблюдательных скважинах. В амплитудно-частотном спектре колебаний напора выделены частотные составляющие техногенного и природного происхождения.

Расчеты с использованием функции взаимной корреляции на количественном уровне показали наличие техногенной составляющей в натуральных колебаниях напоров только в контрольных скважинах, расположенных вблизи полигона. Гидродинамического влияния техногенной составляющей работы эксплуатационных скважин полигона захоронения промышленных отходов в наблюдательных скважинах не выявлено.

Фурье-анализ статистически подтвердил отсутствие влияния режима работы нагнетательных скважин полигона Сибирского химического комбината на радиусах свыше 2000 м.

3. Коноплянцев А.А., Семенов С.М. Прогноз и картирование режима грунтовых вод. — М.: Недра, 1974. — 216 с.
4. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. — М.: Недра, 1986. — 342 с.
5. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / под ред. проф. В.П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-Пресс, 2009. — 248 с.

*Поступила 17.05.2011 г.*