

21. Селиверстов Н. И. Сейсмоакустические исследования переходных зон. — М.: Наука, 1987.—109 с.
22. Тимошин Ю. В., Семенова С. Г. Закономерности отображения в волновых сейсмических полях эпигенетического преобразования отложений вокруг залежей нефти и газа // Геология нефти и газа.—1992.—№ 11.—С. 36—41.
23. Шнюков Е. Ф., Пасынков А. А., Клещенко С. А. и др. Газовые факелы на дне Черного моря. — Киев: ОМГОР НАНУ, 1999.
24. Шпак П. Ф., Чебаненко И. И., Клочко В. П. и др. Оценка нефтегазоносного потенциала подводных недр Черного и Азовского морей с позиций разломно-блоковой тектоники. — Киев, 1993.—63 с.—(Препринт / НАН Украины. ИГН).
25. Шрейдер А. А., Казьмин В. Г., Финетти И. и др. Особенности осадко-накопления в Черном море // Океанология.—2001.—41, № 3.—С. 437—446.
26. Юдин В. В., Герасимов М. Е. Геодинамическая модель Крымско-Черноморского и прилегающих регионов // «Геодинамика Крымско-Черноморского региона»: Сб. матер. конф. — Симферополь, 1997.—С. 16—23.
27. Donelan M., Person W. Radar Scattering and equilibrium ranger in wind-generated waves with applications to scatterometry // J. Geophys. Res.—1987.—92.—Р. 5.
28. Wright J. W. Detection of ocean waves by microwave radar: the modulation of short gravity-capillary waves // Bound. Layer Meteorol.1978.—13.—Р. 87—105.

Наземная заверка результатов дистанционного зондирования гидрогеологических объектов

В. Н. Подорван, Ю. Ф. Филиппов

Центр аэрокосмических исследований земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), в частности СВЧ-зондирование, позволяет оперативно решать региональные гидрогеологические и гидрологические задачи.

К ним относятся прежде всего задачи определения влажности пород (почвогрунтов) зоны аэрации; глубин залегания уровней грунтовых вод (УГВ); обследование районов подтопления (заблачивания), примыкающих к закрытым шахтам; изучение водного баланса на орошаемых массивах, вдоль трасс каналов, в районах водохранилищ, отстойников сточных вод и других естественных и техногенных водных объектов.

Для региональных задач ДЗЗ является вполне обоснованным, так как размеры объектов соизмеримы с масштабами аэрокосмических съемок.

При съемках локальных объектов возникают определенные затруднения, требующие подтверждения результатов ДЗЗ путем проведения наземных исследований на создаваемых тестовых (эталонных) участках.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИН ЗАЛЕГАНИЯ УРОВНЕЙ ГРУНТОВЫХ ВОД

При определении глубин залегания УГВ сигнал СВЧ-зондирования проникает на глубину до 2 м от поверхности земли [6]. В то же время в естествен-

ных условиях почвогрунт всегда содержит некоторое количество влаги. В ненасыщенных почвогрунтах влага может адсорбироваться на поверхности частиц, испаряться, передвигаться в виде пленки под действием капиллярных и гравитационных сил. При этом чем меньше размеры частиц почвогрунта, тем больше поверхность капиллярной влаги в сравнении с ее массой, и следовательно, тем большую роль играют менисковые силы по отношению к силе тяжести. Заполняя сечения капилляров, влага передает гидростатическое давление и при разности напоров в двух точках передвигается. Движение влаги вверх происходит под воздействием капиллярных сил от УГВ на высоту, соответствующую силе капиллярного всасывания, образуя капиллярную зону.

В связи с вышесказанным, СВЧ-сигнал фиксирует лишь верхнюю границу капиллярной каймы.

При полном смачивании частиц высота капиллярного подъема влаги по действием капиллярных сил от УГВ по пористой среде может быть определена по формуле Жюрена [3]

$$h = 2\eta / (g\rho R) = 0.15/R, \quad (1)$$

где h — высота капиллярного поднятия, см; η — поверхностное натяжение воды, Н/м; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; ρ — плотность воды, кг/м^3 ; R — радиус капиллярного промежут-

ка.

В природных условиях высота капиллярного поднятия для средне- и крупнозернистых песков составляет 5—10 см, мелкозернистых — 30 см для пылеватых песков и супесей — до 1 м, в легких суглинках — до 2 м, в легких глинах — до 3—5 м, что не в полной мере соответствует расчетным значениям согласно формуле (1).

Причиной указанных расхождений является отсутствие в приведенной зависимости учета силы трения и изменения диаметра капилляров по вертикали, поэтому почвогрунты необходимо рассматривать как систему, состоящую, в частности, из пор двух размеров: крупных ненасыщенных, в пределах которых преобладает гравитационное движение воды, и мелких, в которых доминирующим является капиллярное течение. В такой постановке данную задачу, за исключением самых простых и скорее неправдоподобных случаев, можно решить только численными методами. В большинстве случаев численные расчеты свидетельствуют о том, что движущийся фронт увлажнения имеет четко выраженный характер [3]. При поступлении воды на земную поверхность происходит ее просачивание вниз, заполнение всех пор или только части их. Схема распределения влаги от поверхности до УГВ может быть представлена в виде трех основных зон:

I — зона, содержащая грунтовую воду, или зона полной влагоемкости (ПВ);

II — зона капиллярной влагоемкости, в которой влага гидравлически связана с грунтовыми водами и может изменять свое высотное положение в зависимости от УГВ;

III — зона наименьшей влагоемкости, в которой механизм удержания подвешенной влаги зависит главным образом от механического и агрегатного состава почвогрунта.

Таким образом, при СВЧ-зондировании возможны очень существенные ошибки определения глубин залегания УГВ, что в свою очередь требует внесения соответствующих поправок на величину капиллярного поднятия.

ОБСЛЕДОВАНИЕ РАЙОНОВ ПОДТОПЛЕНИЯ, ПРИМЫКАЮЩИХ К ЗАКРЫТЫМ ШАХТАМ

В настоящее время возникла проблема мониторинга в районах подтопления (заболачивания) обширных территорий, прилегающих к угольным шахтам, выводимым из эксплуатации способом «мокрой консервации».

Остановка горных работ на закрываемой шахте приводит к обрушению или прогибу очистных выработок и постепенному прогибанию верхних подземных пустот и разуплотнений, что вызывает

проседание дневной поверхности на 3—7 м [5].

В свою очередь, прекращение водоотлива ведет к достаточно быстрому заполнению водой всей системы подземных пустот и разуплотнений, образующих неустойчивый водный бассейн.

Завершение подобного процесса приводит к повышению уровней воды в шахтных стволах (пропускная способность которых намного выше пропускной способности окружающих пород) и формированию «куполов» подземных вод. После этого шахтный ствол становится областью «питания» грунтовых вод, что приводит к выводу из строя сельскохозяйственное водоснабжение (колодцы). Разгрузка шахтных вод в гидрографическую сеть также вызывает повышение минерализации речных вод.

Для принятия мер по локализации подобных процессов требуется изучение явления подъема УГВ, определения его причин и разработка соответствующих математических методов оценки количества воды, поступающей в шахтный колодец, скорости и сроков ее поступления.

Расчет шахтных стволов, работающих в различных гидрогеологических условиях, заключается в определении уровня подземных вод при принятом водопритоке. При этом величина водопритока в шахтные стволы принимается либо постоянной, либо изменяющейся по определенному закону.

Шахтные поля представляют собой систему из нескольких шахт, каждая из которых имеет свой отдельный ствол. В связи с этим нами рассматриваются расчетные зависимости для систем шахтных стволов. Рассмотрены два случая: а) одиночный шахтный ствол; б) группа взаимодействующих шахтных стволов. В последнем случае расчет может быть произведен как с учетом работы каждого конкретного ствола, так и путем замены реальной системы расположения стволов обобщенной системой («большим колодцем») с последующим использованием с определенными изменениями зависимостей для отдельных стволов.

Для расчета шахтных стволов при заданном постоянном водопритоке в каждый конкретный ствол основной является обобщенная формула

$$S = \frac{Q_{\text{СУМ}}}{4\pi km} \sum_{i=1}^N \beta_i R_i, \quad (2)$$

где S — расчетное понижение уровня; $Q_{\text{СУМ}}$ — суммарный водоприток в шахтные стволы; km — водопроводимость пласта; $\beta_i = Q_i/Q_{\text{СУМ}}$ (Q_i — водоприток в i -й ствол, $i = 1, 2, \dots, N$); R_i — фильтрационное гидравлическое сопротивление, зависящее от геометрии границ пласта, условий на границах, расстояния между стволами и других факторов.

Необходимо отметить, что использование форму-

лы (2) правомерно только для напорных горизонтов. Ее использование для безнапорных и напорно-безнапорных горизонтов может привести к серьезным ошибкам, так как при этом не учитывается уменьшение мощности водоносного горизонта.

Расчетные зависимости для определения гидравлических сопротивлений и понижений в шахтных стволах в различных гидрогеологических условиях приведены ниже.

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКОВ В ОДНОРОДНОМ НЕОГРАНИЧЕННОМ ПЛАСТЕ ПРИ $Q = \text{CONST}$

Как известно, при соблюдении условия $r_1^2/4at \leq 0.1$ гидравлическое сопротивление R , входящее в формулу (2), от действия каждого шахтного ствола определяется логарифмическим приближением

$$R_i = \ln \frac{2.25at_i}{r_1^2}, \quad (3)$$

где r_1 — расстояние от шахтного ствола, вызывающего понижение уровня, до рассматриваемой точки; t_i — время работы этого ствола до конца расчетного периода; a — коэффициент пьезопроводности пласта.

Таким образом, для расчета взаимодействующих стволов при постоянном водопитоке, можно использовать следующую модификацию формулы (2):

$$S = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi km} \sum_{i=1}^N \beta_i \ln \frac{2.25at_i}{r_1^2}. \quad (4)$$

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКА В ШАХТНЫЙ СТВОЛ В ОДНОРОДНОМ НЕОГРАНИЧЕННОМ ПЛАСТЕ ПРИ $Q = F(T)$

При скачкообразном изменении дебита предполагается, что весь расчетный период эксплуатации шахты («большого колодца») может быть разбит на N временных интервалов, в течение которых дебит сохраняется постоянным и равным Q_i (в отдельных случаях Q_i может быть равным нулю).

Скачкообразное изменение расхода вызывает соответствующие изменения уровня воды. В этом случае величина понижения уровня в любой момент времени t от начала работы шахты согласно методу наложения течений будет равна алгебраической сумме понижений, вызываемых скачками дебита $Q_i - Q_{i-1}$ в течение соответствующего времени $t_i - t_{i-1}$:

$$S = \frac{Q_n}{4\pi km} R, \quad (5)$$

$$R = \sum_{i=1}^N \beta_i E_i \left[-\frac{r^2}{4a(t - t_{i-1})} \right], \quad (6)$$

$$\beta_i = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{Q_n}, \quad (7)$$

где Q_n — расход ствола («большого колодца») в течение последнего времени эксплуатации; R_c — гидравлическое сопротивление при скачкообразном изменении водопритока.

При определении понижения S в расчетном стволе («большого колодца») или в пределах обобщенной системы значение r в формуле (2) принимается соответственно радиусу ствола r_c или «большого колодца» r_k .

Если

$$\frac{r^2}{4a(t - t_{i-1})} \leq 0.1,$$

то зависимость гидравлического сопротивления от времени будет логарифмической, что можно выразить следующим образом:

$$R_c = \ln \left(\frac{2.25a}{r^2} \right)^{\sum \beta_i} t_{\text{пр}}, \quad (8)$$

$$t_{\text{пр}} = (t - 0)^{\beta_1} (t - t_1)^{\beta_2} \dots (t - t_{n-1})^{\beta_n}, \quad (9)$$

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКОВ В ШАХТНЫЕ СТВОЛЫ В ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТАХ

Условия влияния прямолинейных границ на работу шахтных стволов основан на методе зеркальных отражений. С помощью этого метода реальный полуограниченный или ограниченный пласт заменяется условным неограниченным пластом, в котором по контуру границы сохраняется реальное граничное условие. Последнее достигается введением в расчет отображенных стволов с дебитами, реальных и противоположными по знаку в случае границы с ГУ-I ($H = \text{const}$), одинаковыми — с ГУ-II ($q = 0$).

Полуограниченный пласт (ГУ-I, $H = \text{const}$). При расчете системы взаимодействующих стволов с учетом действия каждого ствола величина понижения уровня определяется по формуле, аналогичной выражению (1):

$$S = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km} \sum_{i=1}^N \beta_i R_i, \quad (10)$$

$$R_i = \ln \frac{\rho_i}{r_i}, \quad (11)$$

где r_i — расстояние между расчетным стволом и стволом, имеющим номер i (для расчетного ствола

$r_i = r_c$ — радиус ствола); ρ_i — расстояние от расчетного ствола до отображения ствола с номером i относительно границы постоянного напора.

Как следует из формулы (11), при наличии контура постоянного напора движение подземных вод стабилизируется, и понижение не зависит от времени. Формула (11) действительна при

$$\frac{r_i^2}{4at} \leq 0.1 \quad \text{и} \quad \frac{\rho_{i\max}}{4at} \leq 0.1.$$

Полуограниченный пласт (ГУ-II, $q = 0$). Понижение уровня воды при работе системы взаимодействующих шахтных стволов рассчитывается по формуле (10). Входящая в эту формулу величина R_i определяется по следующей зависимости:

$$R_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[-E_i \left(-\frac{r_i^2}{4at_1} \right) - E_i \left(-\frac{\rho_i^2}{4at_1} \right) \right].$$

При

$$\frac{r_{i\max}^2}{4at} \leq 0.1 \quad \text{и} \quad \frac{\rho_{i\max}}{4at} \leq 0.1$$

формула преобразуется следующим образом:

$$R_i = \ln \frac{2.25at_1}{r_i \rho_i}.$$

РАСЧЕТ ВОДОПРИТОКОВ В ШАХТНЫЕ СТВолы В НЕОДНОРОДНЫЕ В ПЛАНЕ ПЛАСТЫ (ПРЯМОЛИНЕЙНАЯ ГРАНИЦА РАЗНОРОДНЫХ ЗОН)

В этой схеме неоднородный неограниченный пласт в плане состоит из двух зон с различными значениями водопроницаемости и пьезопроводности, которые разделены прямолинейной границей. Условие на этой границе рассматриваются как условие IV рода.

При длительных водопритоках ($a_1 t / L_T^2 \geq 100$, где L_T — расстояние до границы) понижение уровня в

стволе, расположенном в первой зоне, может быть рассчитано по формуле

$$S = \frac{Q}{4\pi(km)_{\text{CP}}} \left[\ln \frac{2.25a_1 t}{2L_T r_c} + \nu \ln \frac{2L_T}{r_c} + \frac{(1+\nu)\lambda}{2} \right],$$

$$(km)_{\text{CP}} = \frac{(km)_1 + (km)_2}{2},$$

$$\nu = \frac{(km)_2}{(km)_1},$$

где $(km)_1$ и a_1 — водопроницаемость и пьезопроводность зоны, в которой расположен откачиваемый ствол; $(km)_2$ и a_2 — водопроницаемость и пьезопроводность второй зоны; λ — функция, зависящая от соотношения пьезопроводностей.

Таким образом, аналитические расчеты в первом приближении позволяют определить водопристок в шахтные стволы, оценить расчетные параметры, а также определить граничные условия для последующего создания прогнозных гидрогеологических моделей районов подтопления, примыкающих к закрытым шахтам.

1. Блески Дж. Р., Илз К. В. О. Модели водосборных бассейнов с сосредоточенными параметрами // Гидрогеологическое прогнозирование. — М.: Мир, 1988.—С. 381—430.
2. Боровский Б. В., Дробноход Н. И., Язвин Л. С. Оценка запасов подземных вод. — Киев: Выща школа, 1989.—407 с.
3. Гушля А. В., Мезенцев В. С. Воднобалансовые исследования. — Киев: Вища школа, 1982.—229 с.
4. Керкби М. Дж. Гидролого-гидрогеологические условия склонов // Гидрогеологическое прогнозирование. — М.: Мир, 1988.—С. 54—102.
5. Черный Г. И. Классификация математических моделей для разных задач механики горных пород // Использование взрыва в народном хозяйстве. — Киев: Наук. думка, 1990.—Ч. III.—С. 28—36.
6. Шмюгте Т. Дистанционные методы определения влажности почв // Гидрогеологическое прогнозирование. — М.: Мир, 1988.—С. 133—160.