

# Скважинные ядерно-геофизические исследования приповерхностных горных пород. 1

© С. Т. Звольский<sup>1</sup>, А. Ю. Кетов<sup>1</sup>, В. В. Кулик<sup>1</sup>, М. С. Бондаренко<sup>1</sup>,  
С. И. Дейнеко<sup>2</sup>, С. А. Иващенко<sup>2</sup>, О. В. Камилова<sup>1</sup>, З. Н. Евстахевич<sup>1</sup>, 2010

<sup>1</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>ГП Киевский институт инженерных изысканий и исследований «Энергопроект»,  
Киев, Украина

Поступила 29 декабря 2009 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

На основі комплексного використання нейтронного, гамма-гамма- і гамма-каротажу запропоновано нові підходи до визначення петрофізичних параметрів приповерхневих гірських порід в зоні аерації та в зоні, що знаходиться нижче рівня ґрунтових вод. Шляхом збільшення кількості визначуваних параметрів значно розширено інформативність радіоізотопного каротажу. Завдяки комплексуванню геофізичних методів і коректному врахуванню особливостей піщано-глинистих порід, підвищено достовірність і точність визначень вологості, пористості, густини сухої породи, густини твердої фази, глинистості, вмісту хімічно зв'язаної води та інших параметрів.

On the basis of complex use of neutron, density and gamma-ray logging are proposed new approaches to determine of petrophysical parameters of near-surface rocks in zone aeration and in water saturated zone. By increase in number of determined parameters it is considerably expanded of informativity of radioisotope logging. Thanking of the complex of geophysical methods and to the correct account of features of sandy-clay rocks it is raised reliability and accuracy of determinations of humidity, porosity, density of dry rock, density of a solid phase, shaliness, the content of chemically bound water and other parameters.

**Введение.** Приповерхностные горные породы (грунты в инженерной геологии) служат естественным основанием для зданий, инженерных коммуникаций и других сооружений. Плотность, влажность, пористость и другие параметры грунтов используются при расчетах физического состояния и механической прочности грунтового основания сооружений.

Наряду с естественными приповерхностными горными породами имеются значительные массы техногенных грунтов — насыпные участки, дамбы, породные отвалы, хвостохранилища горнодобывающей промышленности и другие, также требующие определения и контроля влажности и плотности, а в ряде случаев еще и оценки содержания в них полезных компонентов.

Большие объемы исследований приповерхностных горных пород обусловили развитие экспрессных методов определения влажности, плотности, пористости, глинистости, водонасыщенности пород в условиях их естественного залегания (in situ). Ведущее

место среди них заняли скважинные ядерно-геофизические методы: нейтрон-нейтронный каротаж (НК) — для определения объемной влажности, плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК) — для определения плотности, интегральный гамма-каротаж (ГК) естественной радиоактивности — для определения глинистости и литологического расчленения разреза [Ферронский и др., 1977; Осипов, 1968; Арцыбашев, 1980; Скважинная ..., 1990].

Вместе с тем методики и аппаратура для определения петрофизических свойств приповерхностных пород методами радиоизотопного каротажа (РК) требуют дальнейшего развития и совершенствования в направлении комплексирования методов и разработки новых способов интерпретации, расширения круга определяемых параметров, повышения точности, достоверности и оперативности измерений.

В частности, показания прибора НК определяются преимущественно влажностью естественных и техногенных грунтов, однако, существенное влияние могут ока-

зывать и другие факторы. Для широко распространенных песчано-глинистых грунтов — это изменение плотности вдоль скважинного разреза, вызванное изменениями пористости, водонасыщенности и минерального состава твердой фазы; наличие химически связанной воды в глинистых минералах и водорода в органическом веществе; содержание аномальных поглотителей нейтронов. Необходимо также различать измерения влажности грунтов методом НК в зоне аэрации и в зоне насыщения (ниже уровня грунтовых вод) и учитывать эти особенности при разработке интерпретационно-методического обеспечения.

Игнорирование этих факторов приводит к неконтролируемым систематическим погрешностям определения влажности, а в случае существенных отклонений от типичных ситуаций — к грубым ошибкам. Имеющиеся методики учета некоторых из указанных факторов (см., например, [ГОСТ 23061-90]) являются усложненными и недостаточно полными для практического применения.

В настоящей статье на основе комплексного использования скважинных ядерно-геофизических методов (НК, ГГК, ГК) предложены новые подходы к определению показателей физического состояния грунта в зоне аэрации и в зоне водонасыщения, расширено количество определяемых показателей. Разработаны способы, позволяющие корректно учесть и отдельно проанализировать основные факторы, влияющие на показания приборов РК, уменьшить систематические погрешности определения влажности, пористости, коэффициента водонасыщенности, плотности сухой породы, повысить достоверность определения ряда показателей путем использования независимых способов.

**Петрофизическая модель.** При интерпретации каротажных данных с целью определения искомых показателей приповерхностных пород необходимо ориентироваться на конкретный состав и реальные свойства этих пород, а также на диапазон изменения их параметров. Для широко распространенных песчано-глинистых грунтов нами выбрана следующая петрофизическая модель, достаточно полно отражающая их основные особенности.

Песчано-глинистая порода состоит из кварцевого песка различных фракций в со-

вокупности со смесью глинистых частиц, содержащих минералы глин (гидрослюда, каолинит, монтмориллонит) в заданных пропорциях; поры породы заполнены водой и воздухом (в зоне аэрации) или водой (в зоне насыщения); влажность породы обусловлена содержанием свободной (гравитационной) воды; вода может быть пресной или минерализованной. Такая порода характеризуется плотностью  $\rho$ , объемной влажностью  $W_V$ , пористостью  $n$ , коэффициентом водонасыщения  $S_r$ , коэффициентом объемной глинистости  $k_{ГЛ}$ , общей минерализацией  $C$  воды, содержанием аномального поглотителя нейтронов  $M_\gamma$ .

Плотность приповерхностных песчано-глинистых пород в большинстве случаев лежит в интервале  $\rho \sim 1,3 \div 2,1$  г/см<sup>3</sup>, плотность твердой фазы  $\rho_s \sim 2,6 \div 2,8$  г/см<sup>3</sup>, влажность  $W_V \sim 5 \div 50$  %, пористость  $n \sim 30 \div 50$  %, коэффициент водонасыщения  $S_r \sim 5 \div 100$  %, глинистость  $k_{ГЛ} \sim 0 \div 40$  %, общая минерализация (соленость) воды  $C \sim 0 \div 50$  г/л.

Кроме вышеприведенных, в рассматриваемой модели используются также следующие петрофизические параметры: плотность сухой породы  $\rho_d$ ; минеральная плотность кварцевого компонента  $\rho_s^{KB}$ ; минеральная плотность глинистого компонента  $\rho_s^{ГЛ}$ ; плотность воды  $\rho_w$ ; массовая влажность  $W_m$ ; водородный индекс глинистых минералов  $\omega_{ГЛ}$ ; объемное содержание химически связанной воды  $C_{х.с.в.}$ .

Петрофизические параметры связаны между собой следующими соотношениями [ГОСТ 23061-90; ДСТУ Б В 2 1-2-96; Добрынин и др., 2004]:

$$W_m = \rho_w W_V / \rho_d, \quad (1)$$

где  $W_m$  — массовая влажность (отношение массы воды к массе сухого грунта), % или д. е. (доли единицы);  $W_V$  — объемная влажность (отношение объема воды к объему грунта), % или д. е.;  $\rho_w$  — плотность воды, принимаемая равной 1 г/см<sup>3</sup>;  $\rho_d$  — плотность сухого грунта, г/см<sup>3</sup>, равная

$$\rho_d = \rho - \rho_w W_V. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  — плотность грунта, г/см<sup>3</sup>:

$$\rho = (1 - n)\rho_s + nS_r\rho_w, \quad (3)$$

где  $\rho_s$  — плотность твердой фазы (плотность твердых частиц грунта), г/см<sup>3</sup>;  $S_r$  — коэффи-

циент водонасыщения (отношение объема воды в порах к объему пор), % или д. е.;  $n$  — пористость породы: отношение объема пор к объему породы, % или д. е., равная

$$n = 1 - \rho_d / \rho_s. \quad (4)$$

Коэффициент водонасыщения связан с другими параметрами грунта следующим соотношением:

$$S_r = W_V / n = W_m \rho_s / e \rho_w, \quad (5)$$

где  $e$  — коэффициент пористости (отношение объема пор к объему твердой фазы), % или д. е., равный

$$e = n / (1 - n). \quad (6)$$

Для песчано-глинистого грунта плотность твердой фазы можно выразить через плотность ее компонентов:

$$\rho_s = k_{гг} \rho_s^{гг} + (1 - k_{гг}) \rho_s^{кб}, \quad (7)$$

где  $\rho_s^{гг}$  — минеральная плотность совокупности глинистых минералов, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_s^{кб}$  — минеральная плотность кварцевого компонента, г/см<sup>3</sup>;  $k_{гг}$  — коэффициент глинистости (отношение объема глинистых минералов к объему породы), % или д. е.;  $C_{х.с.в.}$  — объемное содержание химически связанной воды в глинистом компоненте, % или д. е., равное

$$C_{х.с.в.} = \omega_{гг} k_{гг}, \quad (8)$$

где  $\omega_{гг}$  — водородный индекс глинистых минералов, д. е., показывает содержание химически связанной воды в данном минерале или смеси минералов (для воды  $\omega = 1$ ).

При использовании рассматриваемого комплекса РК влажность породы  $W_V$  можно определить НК вместе с ГК и ГГК, а в зоне водонасыщения еще дополнительно и ГГК; плотность породы  $\rho$  — ГГК; плотность сухой породы  $\rho_d$  — комплексом ГГК, НК и ГК; плотность твердой фазы  $\rho_s$  (в зоне насыщения) — комплексом ГГК, НК и ГК; пористость  $n$  — комплексом НК, ГК и ГГК, глинистость  $k_{гг}$  — ГК, а в зоне водонасыщенности — еще и с помощью комплекса НК и ГГК; объемное содержание химически связанной воды — с помощью ГК, а ниже уровня грунтовых вод — еще и комплексом НК и ГГК; водородный индекс  $\omega_{гг}$  (в зоне водонасыщения) — комплексом НК, ГГК и ГК.

Следовательно, в рамках принятой нами петрофизической модели комплекс методов НК, ГГК и ГК, при определенных условиях

и ряде дополнительных сведений, имеет высокую информативность. Отметим, что при традиционном использовании комплекса ГГК и НК в приповерхностных исследованиях обычно определяются следующие параметры: плотность (ГГК), влажность (НК, ориентировочно — без детального учета глин и особенностей зоны аэрации), а также плотность сухой породы (ГГК и НК, ориентировочно).

**Гамма-гамма каротаж влажности грунтов.** Плотность породы тесно связана с так называемой электронной плотностью вещества; последняя, в области преимущественно комптоновского рассеяния гамма-квантов на электронах ( $E_\gamma \sim 0,2 \div 2$  МэВ), определяется с помощью ГГК. Измеряемый параметр ГГК — эквивалентная плотность, которая для песчано-глинистых грунтов практически совпадает с их объемной плотностью.

В инженерной геологии плотность грунта сама по себе является важнейшим параметром. Однако при определенных условиях плотность породы можно использовать также для получения других параметров, в частности, объемной влажности.

Основное условие для определения влажности грунта через плотность — его полное водонасыщение, т. е. заполнение всех пустот (пор) водой. Формально это условие имеет вид

$$S_r = 1; n = W_V, \quad (9)$$

т. е. коэффициент водонасыщения равен 1, пористость  $n$  совпадает с объемной влажностью  $W_V$ . Тогда в соответствии с уравнениями (3) и (9) имеем

$$W_V = \frac{\bar{\rho}_s - \rho}{\bar{\rho}_s - \rho_w}, \quad (10)$$

где  $\rho$  — плотность грунта, определяемая вдоль скважинного разреза с помощью ГГК;  $\bar{\rho}_s = \text{const}$  — средняя плотность твердой фазы.

Конкретное значение параметра  $\bar{\rho}_s$  устанавливается или эмпирически на основе лабораторных исследований грунтов данного типа, или с помощью комплекса РК (см. раздел «Определение параметров грунтов комплексом методов РК»).

Таким образом, в части скважинного разреза, расположенной ниже уровня грунтовых вод, при условии, что поры полностью насыщены водой, имеется дополнительный

к нейтронному (и независимый) способ определения влажности. Это дает возможность проведения совместного анализа результатов и повышает достоверность определения искомого параметра.

Плотность пород вдоль скважинного разреза измеряют обычно с помощью прибора ГПК типа ППГР-1 (плотностномер поверхностно-глубинный радиоизотопный) диаметром 35 мм с источником гамма-квантов  $^{137}\text{Cs}$  мощностью  $\sim 1,2 \times 10^7$  Бк и детектором  $\text{NaI(Tl)} + \text{ФЭУ}$  [Техническое ..., 1986]. Отметим также, что измерение естественной радиоактивности пород выполняется тем же прибором ППГР-1, но без источника.

**Гамма-каротаж глинистости.** Приповерхностные песчано-глинистые породы классифицируются по содержанию глинистой фракции [Ломтадзе, 1984]: пески (до 3 % вес. или до  $\sim 2$  % об.); супеси (3—10 % вес.,  $\sim 2$ —5 % об.); суглинки (10—30 % вес.,  $\sim 5$ —20 % об.); глины (30—60 % вес.,  $\sim 20$ —35 % об.); тяжелые глины (более 60 % вес., более 35 % об.).

Для песчано-глинистых грунтов за глинистость принимают содержание в породе пелитового материала — частиц размером  $< 0,01$  мм независимо от их минерального состава (собственно глины, полевой шпат, кварц и др.) Однако в большинстве случаев основная масса этих частиц — глинистые минералы [Белюсова, Михина, 1972; Добрынин и др., 2004].

По минеральному составу глины приповерхностных пород состоят, в основном, из гидрослюда (плотность  $2,8$ — $3,2$  г/см $^3$ ,  $\omega_{\text{ГЛ}} \approx 0,1 \div 0,2$ ), монтмориллонита ( $2,4$ — $2,7$  г/см $^3$ ,  $\omega_{\text{ГЛ}} \approx 0,1 \div 0,4$ ) и каолинита ( $2,62$  г/см $^3$ ,  $\omega_{\text{ГЛ}} = 0,36$ ) в разных пропорциях. Во многих случаях для глинистого компонента можно принять среднее значение минеральной плотности  $\rho_s^{\text{гл}} \approx 2,8$  г/см $^3$  и водородного индекса  $\omega_{\text{ГЛ}} \approx 0,2$ .

Глинистость грунтов можно определить с помощью интегрального гамма-каротажа в предположении тесной корреляционной связи между их радиоактивностью и содержанием глинистых минералов. Радиоактивность глинистой фракции зависит не только от содержания калия-40 (например, его нет в каолините), но и от адсорбированных глинистыми частицами соединений других радиоактивных элементов.

Интерпретационный параметр ГПК  $\Delta I_\gamma = f(k_{\text{ГЛ}})$  обладает свойством приблизительной инвариантности [Бондаренко и др., 2010],

что делает его практически независимым от условий проведения каротажа (плотности породы, диаметра скважины, наличия или отсутствия обсадки, типа прибора ГПК и др.)

Установленная общая связь  $\Delta I_\gamma = f(k_{\text{ГЛ}})$  нелинейна [Интерпретация ..., 1988], однако, на ограниченном интервале значений коэффициент объемной глинистости  $k_{\text{ГЛ}}$  связан с двойным разностным параметром  $\Delta I_\gamma$  (д. е.) приближенным уравнением [Бондаренко и др., 2010]:

$$k_{\text{ГЛ}} \approx 0,45 \Delta I_\gamma, \quad k_{\text{ГЛ}} < 30 \%, \quad (11)$$

которое удобно использовать для оценочных определений.

Полученный с помощью ГПК коэффициент глинистости  $k_{\text{ГЛ}}^i$  можно использовать также для оценки значения водородного индекса  $\omega_{\text{ГЛ}}$  (см. раздел «Определение параметров грунтов комплексом методов РК») или, зная  $\omega_{\text{ГЛ}}$  по известному или предполагаемому составу глинистых минералов, согласно формуле (8) получить эффективное объемное содержание химически связанной воды  $S_{\text{х.с.в.}}$ .

**Нейтронный каротаж влажности.** Нейтрон-нейтронный метод (ННМ) определения влажности основан на преимущественном влиянии водородосодержания пород на процессы замедления, термализации и диффузии нейтронов. Для ННМ разработано надежное теоретическое обоснование и технические средства [Ферронский и др., 1977; Осипов, 1968; Арцыбашев, 1980; Козачок, Кулик, 1981; Звольский, 1984; Козачок и др., 1984; Кулик и др., 1998; Кулик, 1999; Звольский и др., 1999; ГОСТ 23061-90; Скважинная ..., 1990; Troxler ..., 2006; CPN ..., 2004].

Сущность НК состоит в перемещении прибора вдоль скважинного разреза, облучении исследуемых грунтов стационарным источником быстрых нейтронов, регистрации на одном или нескольких зондах медленных (НКМ) или надтепловых (НКнт) нейтронов, которые образовались в результате взаимодействия нейтронов с ядрами вещества грунта, и интерпретации показаний прибора.

В инженерно-геологических исследованиях НК реализуют в неглубоких скважинах (от несколько метров до несколько десятков метров) малого диаметра  $\sim 51$ — $76$  мм. Измерения обычно проводят в «сухих» (незаполненных водой) скважинах: необсажен-



ных (в зоне аэрации) или обсаженных закрытыми снизу стальными трубами (как в зоне аэрации, так и ниже уровня грунтовых вод). В этих же скважинах проводят ГГК и ГК.

Однако в реальных условиях измерений показания прибора НК зависят не только от влажности, но и от содержания химически связанного водорода (в глинистых минералах, в органическом веществе и др.), от наличия пустот (пор), заполненных не только водой, но и воздухом (в зоне аэрации), а также от содержания аномальных поглотителей. Поэтому в общем случае для определения влажности с помощью НК необходимо привлекать другие методы (ГК, ГГК).

**Расчет показаний приборов НК.** В рассматриваемых условиях измерений (заполненная воздухом скважина малого диаметра) влиянием прибора и скважины на пространственное распределение надтепловых и тепловых нейтронов в первом приближении можно пренебречь. При этом прибор моделируется в виде точечного источника и цилиндрического  $^3\text{He}$ -детектора нейтронов диаметром  $d$  и активной длиной  $l \gg d$  с рабочим давлением газа  $P$ . Рассматриваются два типичных варианта взаимного расположения источника и счетчика: 1) источник расположен в торце счетчика на различных расстояниях от него; 2) источник расположен на середине счетчика вплотную к его стенке.

В условиях как малых, так и относительно больших расстояний между источником и детектором (различных длин зондов), а также широкого диапазона изменения водородсодержания и нейтронопоглощающих свойств пород наиболее приемлемым для расчета потоков надтепловых и тепловых нейтронов является использование универсальной физической модели замедления и диффузии на основе  $P_2$ -приближения [Козачок, Кулик, 1981; Козачок и др., 1984].

Для расчета скорости счета медленных и надтепловых нейтронов в геологических средах была разработана программа CORA (от count rate — скорость счета) (авторы В. В. Кулик, Ю. В. Яковлев, 1990; модификация Т. М. Гусак, 2004). Программа позволяет выполнить, с учетом характеристик  $^3\text{He}$ -детекторов, расчет показаний одно-, двух- и многозондовых приборов по медленным и надтепловым нейтронам во всем диапазоне изменения параметров горных пород.

Нормировка расчетных значений скорости счета осуществляется с помощью экс-

периментальных данных, полученных на физических моделях. С учетом ограниченности и трудности физического моделирования, математическое моделирование НК значительно расширяет возможности анализа различных вариантов петрофизических свойств горных пород.

Приведенные в статье расчеты выполнены по программе CORA.

**Физическая модель** должна служить первичным эталоном, воспроизводящим с наибольшей достоверностью и точностью основные характеристики моделируемого объекта [Блюменцев и др., 1991].

Градуировочные зависимости приборов НК (связь показаний прибора с влажностью при заданных условиях измерений) могут быть построены с помощью различных вариантов физических моделей, в той или иной мере отражающих свойства пород и условия измерений. В частности, это может быть набор насыпных моделей в широком интервале «сухой» плотности (различной пористости) и водонасыщения [ГОСТ 23061-90], однако, реализация полного набора таких моделей сильно затруднена.

Широкое распространение получили измерения в натуральных моделях, в которых используются грунты с известными свойствами, близкими к свойствам приповерхностных пород данной исследуемой площади [International ..., 2008].

В качестве универсальных физических моделей-имитаторов влажности для построения «заводской» градуировочной зависимости приборов НК используют устройства, состоящие из набора пластин алюминия и плексигласа в различных объемных соотношениях, пересеченных стальной трубой [Pat. US 4152600, 1979]. Необходимо отметить, что эти модели в целом удачно имитируют нейтронный каротаж влажности, но только «в среднем». Они не отражают многие важные особенности моделируемых горных пород, таких, как переменная глинистость, неполное заполнение пор водой в зоне аэрации (в различных соотношениях вода/воздух). К тому же состав, плотность и водородсодержание плексигласа и воды заметно отличаются, а алюминий по своим нейтронным свойствам — не то же самое, что твердая фаза песчано-глинистых пород.

Авторы предлагают построение зависимости показаний приборов НК от влажности песчано-глинистых пород в зоне аз-

рации осуществить на основе однотипных насыпных моделей из кварцевого песка пористостью  $n \sim 40\%$ . Такие модели позволяют получить значения  $W_V \sim 2 \div 5\%$  (влажный песок) и значения  $W_V$ , приближающиеся к  $40\%$  (водонасыщенный песок). Для получения промежуточных точек по влажности  $W_V$  можно воспользоваться песком с минимальной примесью глинистого материала, который хорошо «держит» влажность (например, бентонит).

Насыпной материал засыпают в цилиндрическую емкость с размерами, достаточными для исключения краевых эффектов во всем диапазоне влажности. Необсаженная скважина может моделироваться тонкостенной алюминиевой трубой соответствующего диаметра, обсаженная — стальной трубой, используемой при каротажных измерениях.

Такая полномасштабная физическая модель отражает литологическую особенность песчано-глинистых пород (основной минеральный компонент которых — кварцевый песок), их характерные пористость, изменения интервалов влажности и водонасыщенности, а также геометрические условия измерений. Использование градуировочных зависимостей, полученных в рамках этой модели, предполагает, что при исследовании реальных разрезов различной глинистости поправку за водородосодержание глинистых минералов можно учесть с помощью ГК, а отличия исследуемых пород от модели по пористости и водонасыщенности — посредством плотностного фактора с использованием данных ГК.

Для получения градуировочной зависимости НК в условиях ниже уровня грунтовых вод необходимо дополнительно построить модели с меньшей водонасыщенной пористостью, используя смесь песка различных фракций, или воспользоваться математическим моделированием.

**Однозондовый нейтронный каротаж по медленным нейтронам.** В связи с требованиями радиационной безопасности в приповерхностных исследованиях используют нейтронные источники небольшой мощности. Для достижения требуемой статистической точности длина зонда скважинных влагомеров выбирается как можно короче (в доинверсионной области), а снятие показаний прибора осуществляют в дискретной форме (поточечно) при приемлемой экспозиции измерений. Для влагомеров с доин-

версионным зондом увеличение влажности приводит к росту показаний, а градуировочная зависимость приближается к прямой линии.

К подобным нейтронным влагомерам относится распространенный переносной прибор НКм типа ВПГР-1 (влагомер поверхностно-глубинный радиоизотопный) [Техническое ..., 1982]. Диаметр скважинного прибора —  $35\text{ мм}$ , источник нейтронов —  $^{238}\text{Pu-Be}$  с выходом до  $5 \times 10^4$  нейтронов/с, детектор медленных нейтронов —  $^3\text{He}$ -счетчик типа СНМ-17 ( $P=7\text{ атм}$ ,  $d=1,8\text{ см}$ ,  $l=21\text{ см}$ ). Источник нейтронов в этом приборе расположен вплотную к стенке счетчика на его середине, что минимизирует длину зонда.

Для прибора ВПГР-1 обычно используется «универсальная» градуировочная зависимость, полученная с помощью плексигласо-алюминиевого имитатора влажности.

Мы будем различать градуировочные зависимости для зоны аэрации и для зоны водонасыщения, для необсаженных и обсаженных скважин.

Градуировочные зависимости для прибора ВПГР-1 в зоне аэрации построены нами с помощью насыпных моделей из крупно- и мелкозернистого кварцевого песка различной влажности. Пористость моделей составляла  $40 \pm 2\%$ , влажность изменялась в интервале  $\sim 3\text{—}38\%$ .

По центру цилиндрической модели диаметром и высотой  $0,9\text{ м}$  устанавливалась алюминиевая труба диаметром  $52\text{ мм}$  с толщиной стенки  $1\text{ мм}$  с закрытым нижним концом. Эта труба моделировала заполненную воздухом необсаженную скважину в зоне аэрации. Для моделирования обсаженной скважины в трубу из алюминия вставлялась стальная труба диаметром  $51\text{ мм}$  с толщиной стенки  $5,5\text{ мм}$ . Такая труба обычно используется при прохождении скважины путем вибропогружения водогерметически оборудованной стальной трубы для проведения каротажа приборами радиоизотопного каротажа (РК) как в зоне аэрации, так и ниже уровня грунтовых вод [Звольский, Череповский, 1965; Звольский, 1980].

На рис. 1 представлены градуировочные зависимости для определения влажности пород с использованием прибора ВПГР-1. Зависимости приведены в относительных (водяных) единицах  $B=I/I_w$  ( $I$  — скорость счета импульсов в модели,  $I_w$  — в бочке с

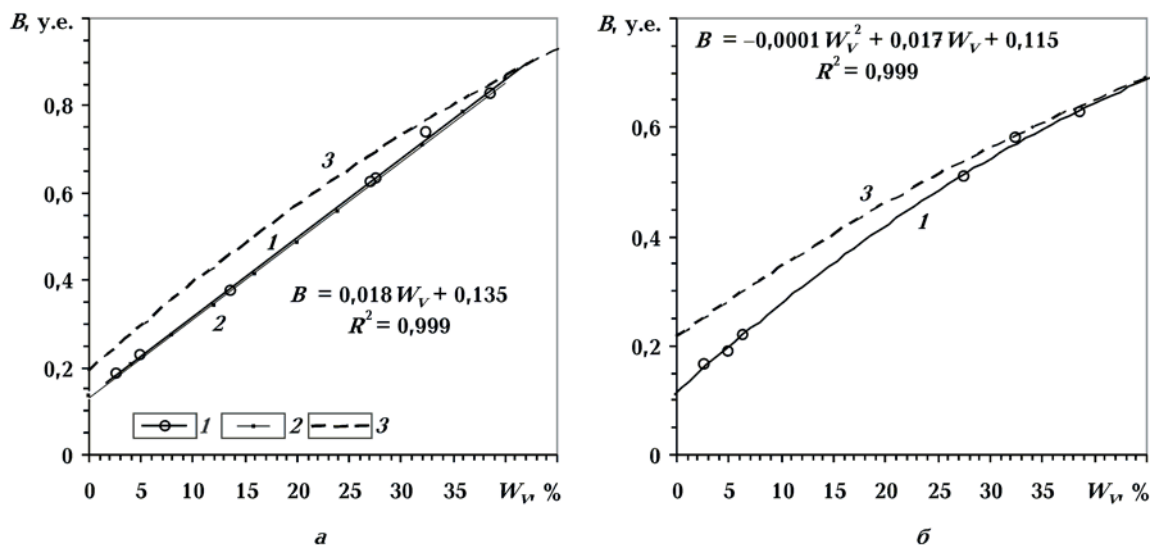


Рис. 1. Градуировочные зависимости для определения влажности песчано-глинистых грунтов прибором ВПГР-1 (*а* — необсаженная скважина, *б* — обсаженная скважина): 1 — данные по физическим моделям ИГФ НАН Украины для зоны аэрации ( $n \sim 40\%$ ); 2 — расчет для  $n = 40\%$ , нормирование по экспериментальным данным; 3 — расчет для  $S_r = 100\%$ , нормирование по экспериментальным данным.

пресной водой), что позволяет применять их для нейтронных источников разной мощности, а также нивелирует особенности каждого конкретного прибора данного типа.

Экспериментальная градуировочная зависимость 1 для необсаженной скважины в зоне аэрации близка к прямолинейной во всем рассматриваемом интервале влажности (рис. 1, *а*). Полученная по программе CORA расчетная зависимость 2 при соответствующей нормировке практически совпадает с экспериментальной. Для сравнения приведена нормированная расчетная кривая 3 для песчаника различной пористости при полном насыщении пор.

Из сравнения зависимостей 1 и 3 видно, что при одной и той же скорости счета отличие в определяемой влажности может составлять до  $\sim 5\%$  абс. Поэтому в зоне аэрации необходимо использовать градуировочную зависимость типа 1, наиболее адекватно отражающую моделируемое свойство исследуемых пород в этой зоне (переменная водонасыщенность пор). Отличия реальных пород в пористости и водонасыщенности, а также глинистости можно учесть с помощью поправочных факторов.

Экспериментальная зависимость для обсаженной стальной трубой скважины в зоне аэрации при высоких значениях влажности (рис. 1, *б*) становится более пологой, что связано со свойствами железоводной системы [Кожевников и др., 1990]. Для зоны

ниже уровня грунтовых вод приведена нормированная расчетная кривая 3. Видно существенное различие зависимостей в зоне аэрации (кривая 1) и в зоне ниже уровня грунтовых вод (кривая 3).

В реальных случаях чисто песчаные породы, для которых построены градуировочные зависимости по физическим моделям, встречаются редко. Для определения влажности прибором НК в зоне аэрации необходимо учесть отклонения плотности, вызванных отклонениями пористости и водонасыщенности от смоделированных условий, а также учесть влияния глинистости.

**Учет изменения плотности грунта.** Изменение плотности песчано-глинистых приповерхностных пород в зоне аэрации обусловлено, в основном, неконтролируемым (при измерениях только прибором НК) изменением пористости и водонасыщенности, а также повышенной минеральной плотностью глин по сравнению с плотностью кварца. Эти факторы влияют на показания прибора НК, поэтому для определения истинной влажности необходимо внести соответствующие поправки.

Изменения пористости и водонасыщенности в зоне аэрации однозначно связаны с изменениями плотности. Е. L. Greasen и G. Schrale [1976] предложили учитывать влияние изменения плотности грунта на показания нейтронного влагомера с доинверсионным зондом путем коррекции ре-

гистрируемой скорости счета  $I_0$  с помощью эмпирического плотностного фактора:

$$I = I_0 \sqrt{\frac{\bar{\rho}_d}{\rho_d}}. \quad (12)$$

Здесь  $I$  — интерпретационный параметр (показания прибора  $I_0$ , умноженные на плотностной фактор  $f_{\rho_d} = \sqrt{\bar{\rho}_d/\rho_d}$ ),  $\rho_d$  — плотность сухого грунта,  $\bar{\rho}_d$  — средняя плотность сухого грунта в разрезе скважины.

Формула (12) использовалась для построения градуировочной зависимости на основе лабораторных данных по «сухой» плотности. Монолиты для лабораторных исследований отбираются в типичных точках исследуемой площади в неглубоких разрезах (до 2 м) (речь идет об измерениях для сельскохозяйственных потребностей).

Такая методика измерений, чрезвычайно громоздкая и дорогая, требует лабораторных определений  $\rho_d$  на каждом новом объекте изысканий. Фактически процедура непригодна для инженерной геологии, где глубина скважин в зоне аэрации может достигать 10 м и более.

Авторы предлагают использовать в выражении типа (12) не плотности сухого грунта  $\rho_d$  и  $\bar{\rho}_d$ , а плотности грунта  $\rho$  и  $\bar{\rho}$ , полученные с помощью ГГК. Эти измерения практически всегда проводятся вместе с НК.

Интерпретационный параметр с использованием измеряемой ГГК плотности пород (вместо «сухой» плотности, получаемой в лаборатории) принимает вид:

$$I = I_0 \sqrt{\frac{\bar{\rho}}{\rho}}. \quad (13)$$

Для сравнения подходов (12) и (13) были выполнены расчеты, моделирующие показания прибора НК ВПГР-1 с нейтронным источником единичной мощности. Рассмотрена модель песчаного грунта с типичной для приповерхностных пород пористостью 30, 40 и 50 % ( $\rho_d = 1,85; 1,59$  и  $1,32$  г/см<sup>3</sup>) с коэффициентом насыщения от 0 до 100 % для каждой пористости. Для сравнения рассмотрена также модель водонасыщенного песка в интервале пористости 0—50 %. Результаты представлены на рис. 2.

Кривые 1, 2, 3 на рис. 2, а соответствуют указанным пористостям и коэффициентам водонасыщения. Пунктирная кривая 4 получена для водонасыщенного песка при изменении пористости от 0 до 50 %. Видно, что одна и та же скорость счета соответствует различной влажности. В интервале рассматриваемых пористостей различие во влажности в зоне аэрации может достигать 5 % абс.

Однако, если каждую из зависимостей 1, 2, 3 умножить на плотностной фактор в со-

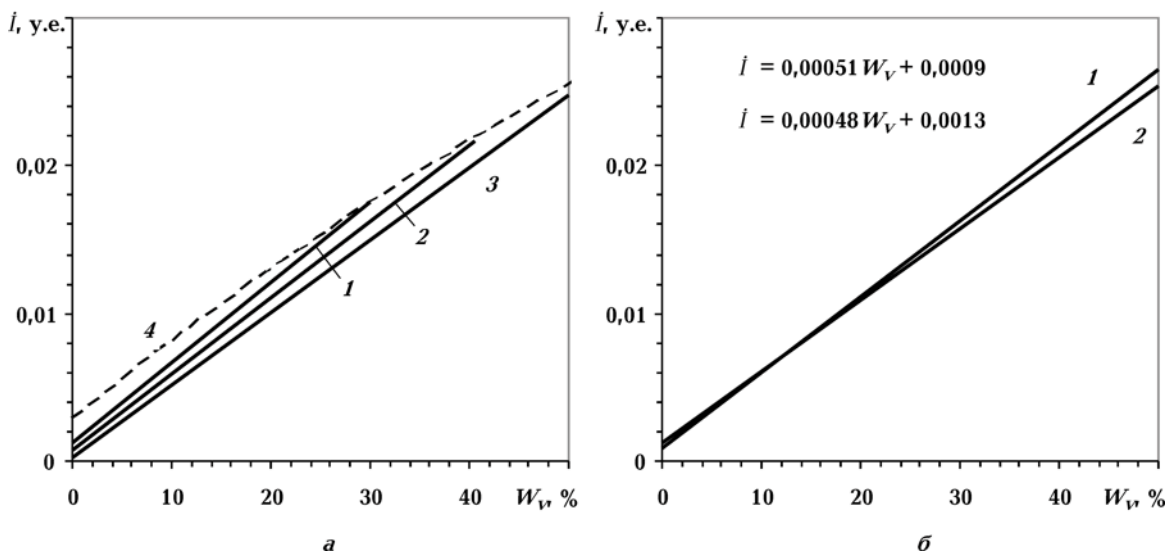


Рис. 2. Расчетные зависимости показаний прибора НК от влажности в зоне аэрации: а — без поправочного плотностного фактора (песок пористостью 30 % (1), 40 % (2), 50 % (3) различного водонасыщения; 4 — водонасыщенный песок различной пористости), б — с поправкой за изменение плотности (1 — по формуле (12), 2 — по формуле (13)).



ответствии с формулами (12) и (13), то для варианта (12) получим прямую 1, а для варианта (13) — прямую 2 (рис. 2, б). Полученные зависимости 1 и 2 практически не отличаются и соответствуют пористости ~40%, наиболее характерной для приповерхностных пород в зоне аэрации.

Плотностной фактор  $f_p = \sqrt{\bar{\rho}/\rho}$  носит компенсационный характер: для доинверсионных зондов увеличение плотности приводит к росту скорости счета  $I_0$  и наоборот. Например, при данной влажности увеличение пористости приводит к уменьшению плотности и соответствующему уменьшению показаний прибора, уменьшение пористости — к возрастанию показаний.

Следовательно, использование плотностного фактора приводит показания прибора для относительно широкого интервала пористости ~30—50 % и соответствующей влагонасыщенности к единой зависимости. Практически это означает, что скорректированные показания прибора, полученные в скважинном разрезе, можно интерпретировать с помощью градуировочной зависимости, полученной на физических моделях (см. рис. 1).

**Учет глинистости.** На показание прибора НК сильное влияние оказывает глинистость пород. Это влияние обусловлено: закрытой водонасыщенной пористостью глин и их капиллярной влажностью; содержанием химически связанной воды; повышенной плотностью по сравнению с неглинистыми породами того же водородосодержания.

Общая влажность грунта по комплексу РК с учетом химически связанной воды определяется соотношением

$$W_V^{PK} = W_V^{n+\gamma} - \omega_{гл} k_{гл}^Y, \quad (14)$$

где  $W_V^{n+\gamma}$  — нейтронная влажность с учетом плотностного фактора;  $k_{гл}^Y$  — коэффициент объемной глинистости, определяемый с помощью ГК;  $\omega_{гл}$  — водородный индекс глин, который можно оценить по известным априорным сведениям или получить с помощью НК+ГК (см. раздел «Определение параметров грунтов комплексом методов РК»)

На рис. 3 представлены зависимости относительной скорости счета прибора ВПГР-1 от влажности песчано-глинистых пород пористостью 40 % различной глинистости. Глинистые минералы представлены смесью: 1/3 часть гидрослюда, 1/3 каолинита и 1/3 монтмориллонита ( $\rho_s^{ст} = 2,8 \text{ г/см}^3$ ,  $\omega_{гл} = 0,2$ ).

Расчетные данные нормированы при  $k_{гл} = 0$  по экспериментальным значениям, соответствующим необсаженной скважине диаметром 50 мм. Измеренная зависимость для  $k_{гл} \approx 0$  получена на физических моделях, а для  $k_{гл} \approx 10\%$  — с помощью натуральных моделей.

Как видно из рис. 3, в зоне аэрации полученные зависимости имеют вид параллельных прямых линий со сдвигом по влажности, равным приблизительно 2, 6 и 12 % в соответствии с содержанием химически связанной воды. Отметим, что такая серия зависимостей может служить в качестве градуировочных при известных глинистости и соотношении глинистых минералов в конкретных условиях исследования.

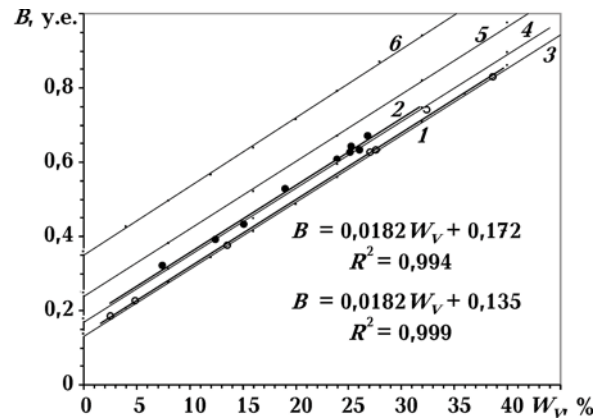


Рис. 3. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3—6) зависимости показаний прибора ВПГР-1 от влажности песчано-глинистого грунта пористостью ~40 %: 1, 3 —  $k_{гл} \approx 0\%$ , 2, 4 —  $k_{гл} \approx 10\%$ , 5 —  $k_{гл} = 30\%$ , 6 —  $k_{гл} = 60\%$ . Белые и черные кружки — экспериментальные точки.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет учесть существенное влияние глин при определении влажности песчано-глинистых пород.

**Определение параметров грунтов комплексом методов РК.** Стандартный комплекс радиоизотопного каротажа (РК) для приповерхностных исследований грунтов включает три метода: ГК, ГП и НК. Это дает возможность определять плотность  $\rho^{YY}$  (ГПК), глинистость  $k_{гл}^Y$  (ГК) и влажность  $W_V^{PK}$  пород вдоль всего скважинного разреза, который в общем случае включает как зону аэрации, так и зону водонасыщения. Используя эти же методы каротажа и ряд независимых сведений, можно получить также дополнительные параметры, представляющие интерес для инженерной геологии. При этом необходимо различать особенности зоны аэра-

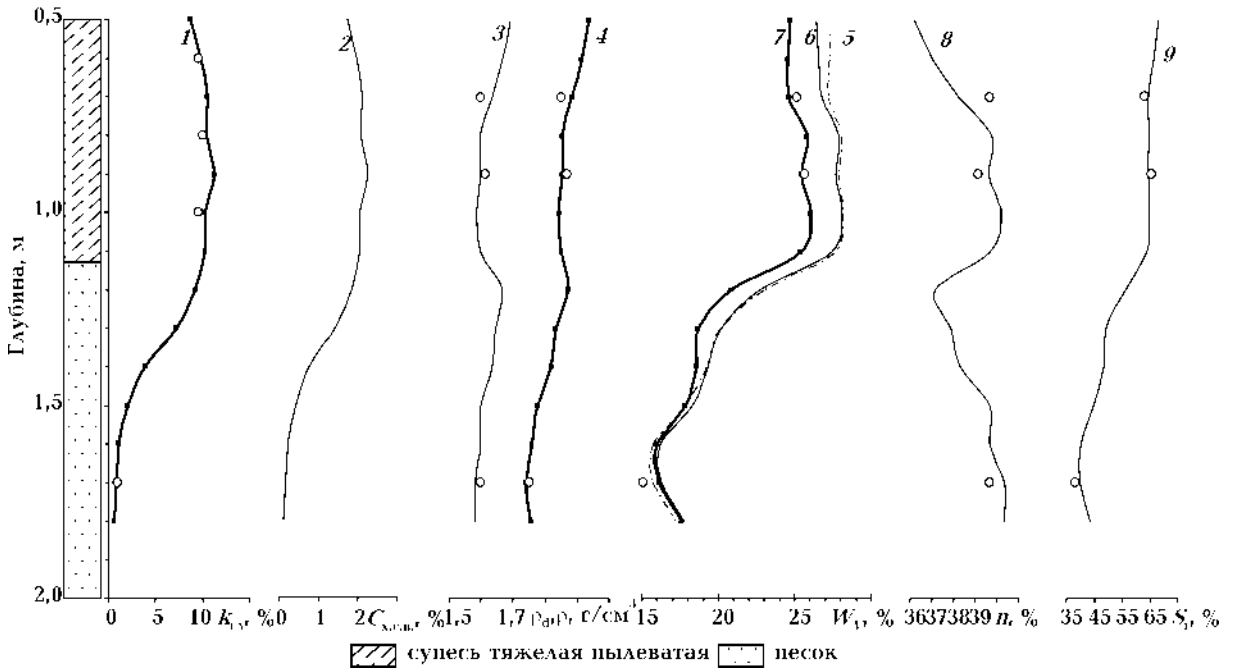


Рис. 4. Распределение параметров грунта вдоль разреза скважины (опытно-методическая площадка ИГФ): 1 — глинистость  $k_{гн}^y$ , 2 —  $C_{х.с.в.}^y$ , 3 — плотность сухого грунта  $\rho_d^{PK}$ , 4 — плотность  $\rho^y$ , 5 — влажность  $W_v^n$ , 6 —  $W_v^{n+n}$ , 7 —  $W_v^{PK}$ , 8 — пористость  $n^{PK}$ , 9 — водонасыщенность  $S_r^{PK}$ . Белые кружки — лабораторные определения.

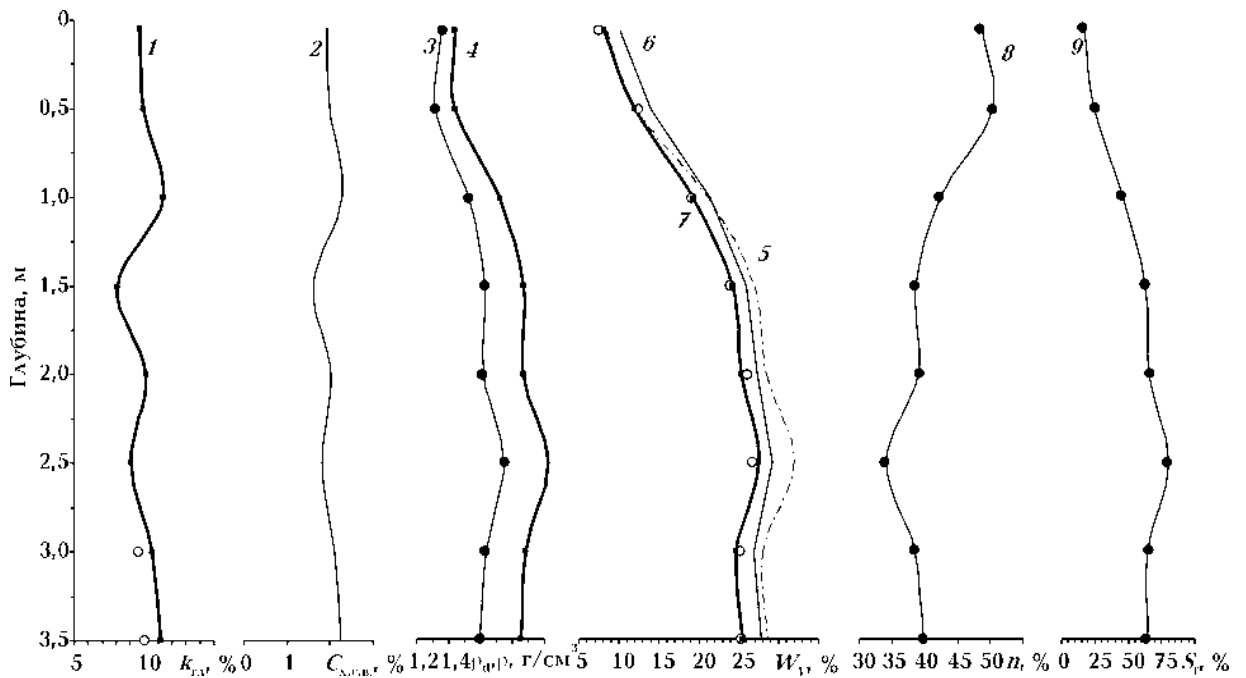


Рис. 5. Распределение параметров грунта вдоль условного разреза, составленного из натуральных моделей ИГФ: 1 — глинистость  $k_{гн}^y$ , 2 —  $C_{х.с.в.}^y$ , 3 — плотность сухого грунта  $\rho_d^{PK}$ , 4 — плотность  $\rho^y$ , 5 — влажность  $W_v^n$ , 6 —  $W_v^{n+n}$ , 7 —  $W_v^{PK}$ , 8 — пористость  $n^{PK}$ , 9 — водонасыщенность  $S_r^{PK}$ . Белые кружки — лабораторные определения, черные кружки — данные с использованием лабораторных и каротажных измерений.

ции и участка разреза, находящегося ниже уровня грунтовых вод.

**Зона аэрации.** Кроме вышеуказанных параметров, комплексом методов РК дополнительно определяются:

- плотность сухого грунта (включая глины) (см. формулу (2))

$$\rho_d^{PK} = \rho^{\gamma} - \rho_w W_V^{PK}, \quad (15)$$

где влажность  $W_V^{PK}$  получена с учетом глинистости и изменения плотности грунта вдоль скважинного разреза;

- пористость (см. формулу (4))

$$n^{PK} = 1 - \rho_d^{PK} / \rho_s, \quad (16)$$

где плотность твердой фазы  $\rho_s = \text{const}$  задается на основании предварительного изучения или исходя из общих соображений;

- коэффициент водонасыщения (согласно формулам (5), (15), (16))

$$S_r^{PK} = \rho_s W_V^{PK} / (\rho_s - \rho^{\gamma} + \rho_w W_V^{PK}); \quad (17)$$

- объемное содержание химически связанной воды (см. формулу (8))

$$C_{x.c.v.}^{\gamma} = \omega_{гг} k_{гг}^{\gamma}, \quad (18)$$

где водородный индекс глин  $\omega_{гг} = \text{const}$  задается независимо.

На рис. 4 и 5 представлены распределения петрофизических параметров грунтов вдоль разреза необсаженной скважины ( $d_{СКВ} = 50$  мм) в зоне аэрации, полученные с помощью комплекса приборов РК ППГР-1 и ВПГР-1. Видно, что каротажные данные хорошо согласуются с лабораторными определениями параметров.

Кроме семи параметров, приведенных выше, на рис. 4 и 5 кривая 5 для влажности  $W_V$  получена только по данным НК ( $W_V^n$ , без учета изменения плотности и глинистости), кривая 6 — по данным НК + ГГК ( $W_V^{n+\gamma}$ , без учета глинистости). Сопоставление диаграмм 5 и 6 показывает, что учет изменения плотности может как увеличивать, так и уменьшать влажность по НК (до примерно 2,5 % абс., рис. 5) в зависимости от пористости и водонасыщенности грунта. Учет глинистости всегда уменьшает влажность  $W_V^{n+\gamma}$  и приводит к ее «истинному» значению  $W_V^{PK}$ .

**Зона водонасыщения.** В зоне ниже уровня грунтовых вод (в предположении, что поры полностью насыщены водой), кроме вышеприведенных семи параметров ( $\rho^{\gamma}$ ,  $k_{гг}^{\gamma}$ ,  $W_V^{PK}$ ,  $\rho_d^{PK}$ ,  $n^{PK}$ ,  $S_r^{PK}$ ,  $C_{x.c.v.}^{\gamma}$ ), используя

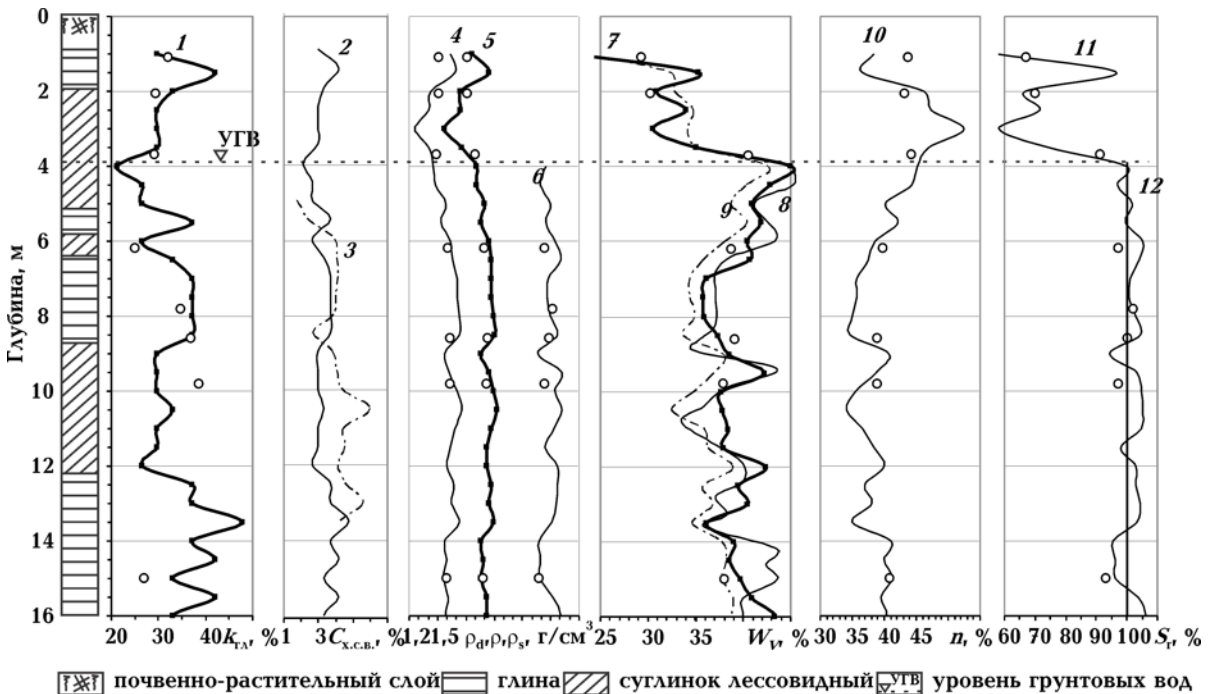


Рис. 6. Распределение параметров грунта вдоль разреза скважины № 1: 1 — глинистость  $k_{гг}^{\gamma}$ , 2 —  $C_{x.c.v.}^{\gamma}$ , 3 —  $C_{x.c.v.}^{n+\gamma}$ , 4 —  $\rho_d^{PK}$ , 5 —  $\rho^{\gamma}$ , 6 —  $\rho_s^{PK}$ , 7 —  $W_V^{PK}$ , 8 —  $W_V^{PK}$ , 9 —  $W_V$  по стандартной методике, 10 — пористость  $n^{PK}$ , 11 — водонасыщенность  $S_r^{\gamma}$ , 12 —  $S_r^{\gamma}$ . Белые кружки — лабораторные определения.

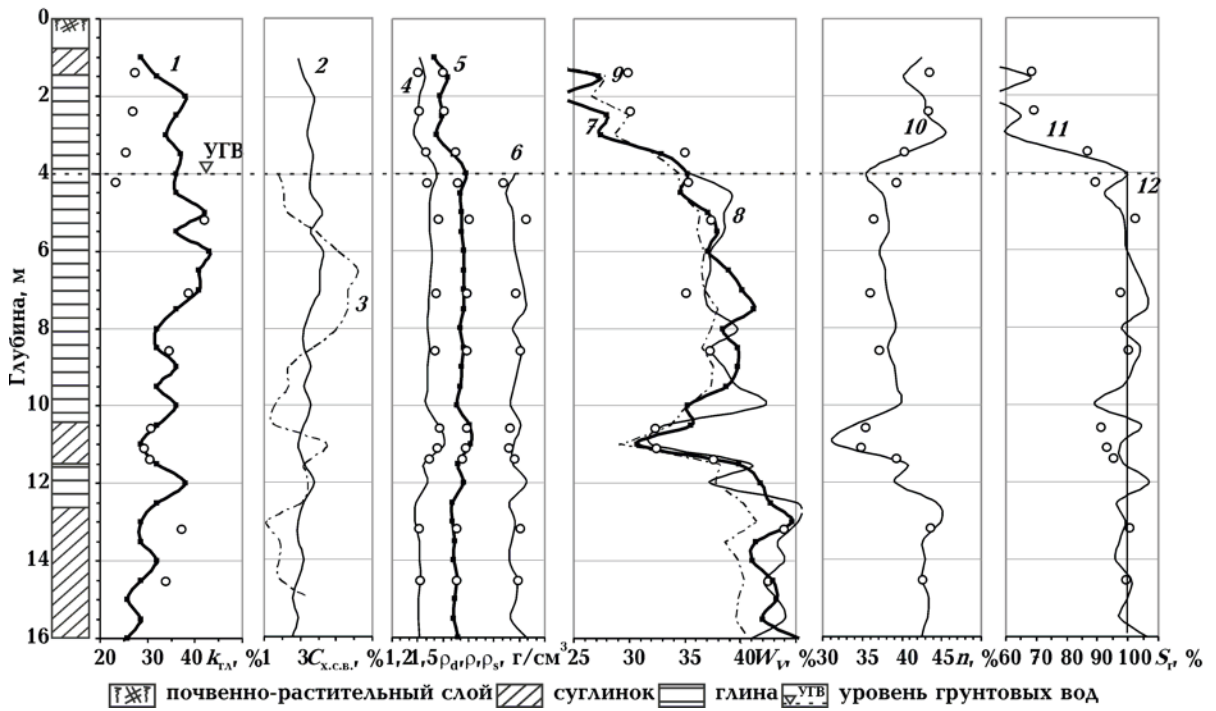


Рис. 7. Распределение параметров грунта вдоль разреза скважины № 2. Обозначения см. на рис. 6.

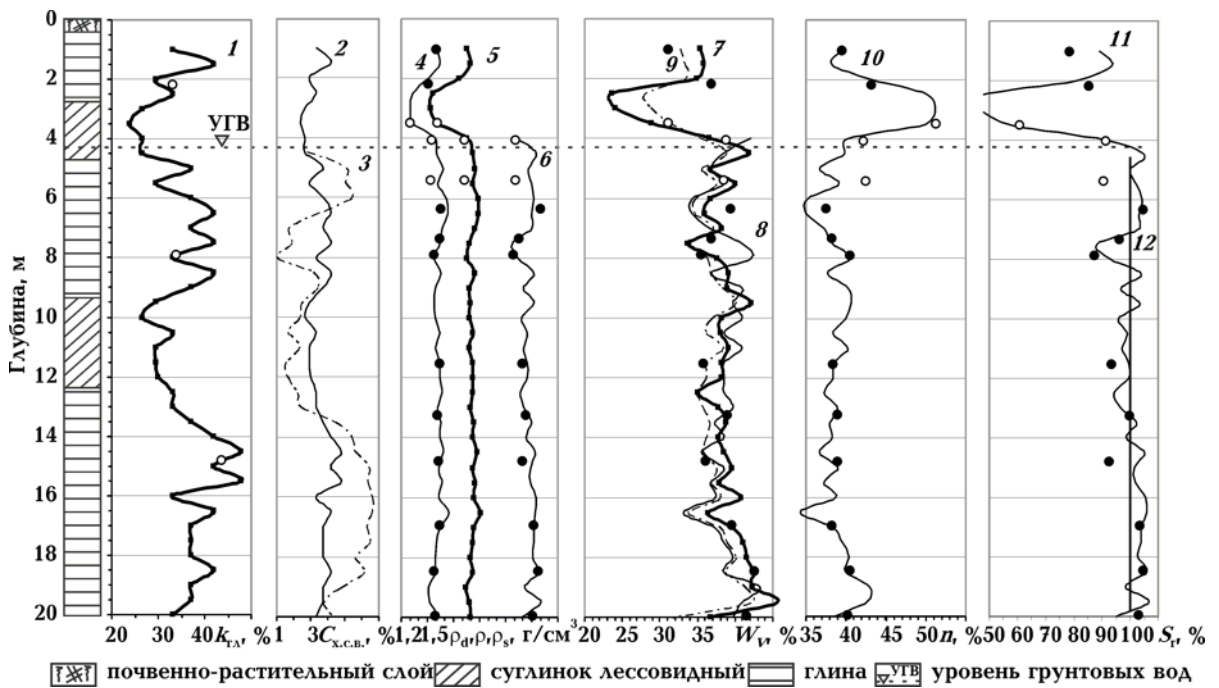


Рис. 8. Распределение параметров грунта вдоль разреза скважины № 3. Обозначения см. на рис. 6.

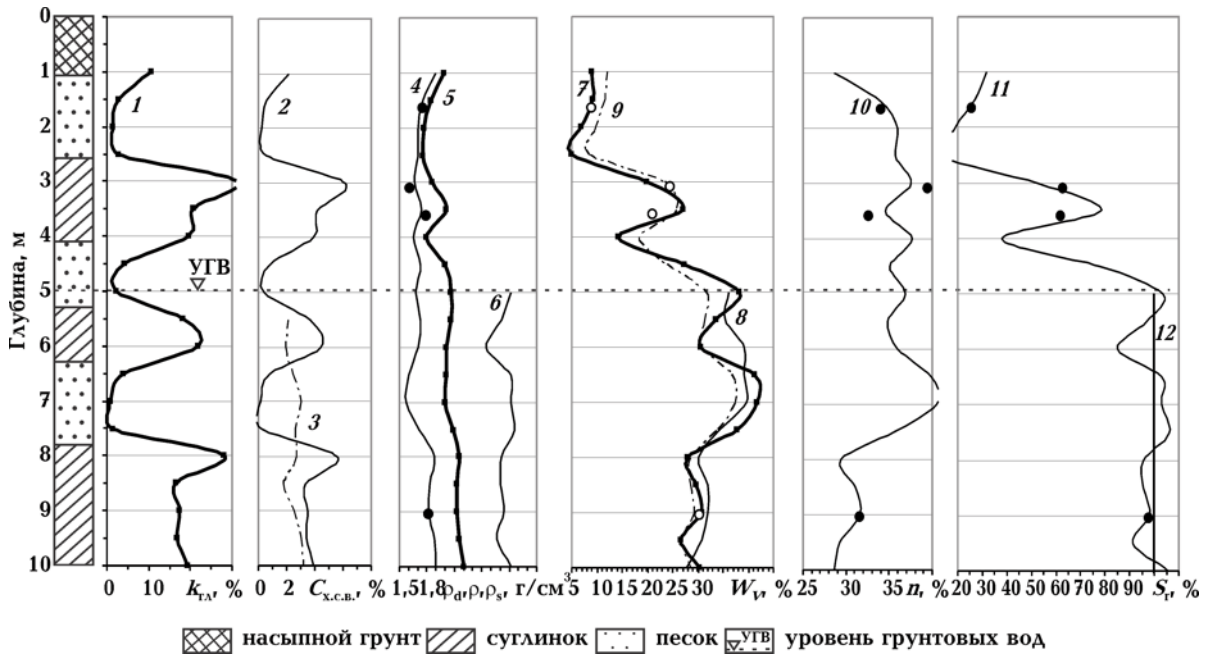


Рис. 9. Распределение параметров грунта вдоль разреза скважины № 4. Обозначения см. на рис. 6.

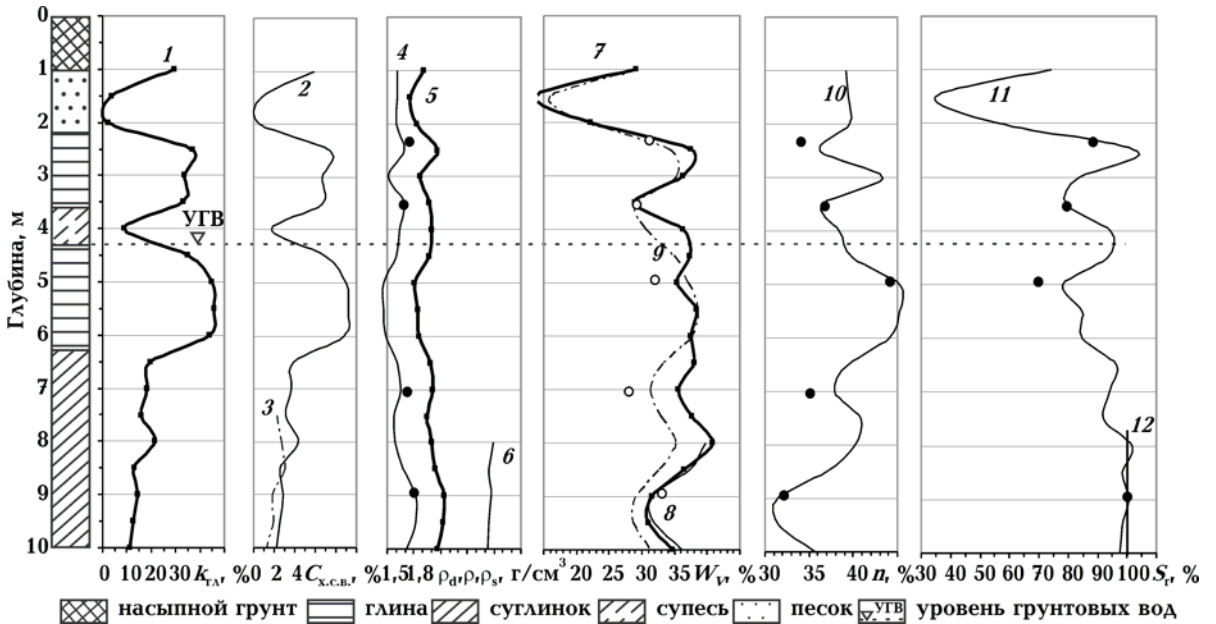


Рис. 10. Распределение параметров грунта вдоль разреза скважины № 5. Обозначения см. на рис. 6.

данные ГГК, дополнительно имеем следующие параметры:

- влажность  $W_V^{YY}$

$$W_V^{YY} = \frac{\bar{\rho}_s^{PK} - \rho^{YY}}{\bar{\rho}_s^{PK} - \rho_w}; \quad (19)$$

- плотность твердой фазы

$$\rho_s^{PK} = \frac{\rho^{YY} - \rho_w W_V^{PK}}{1 - W_V^{PK}}; \quad (20)$$

- объемное содержание химически связанной воды

$$C_{x.c.b.}^{n+iB} = W_V^n - W_V^{YY}; \quad (21)$$



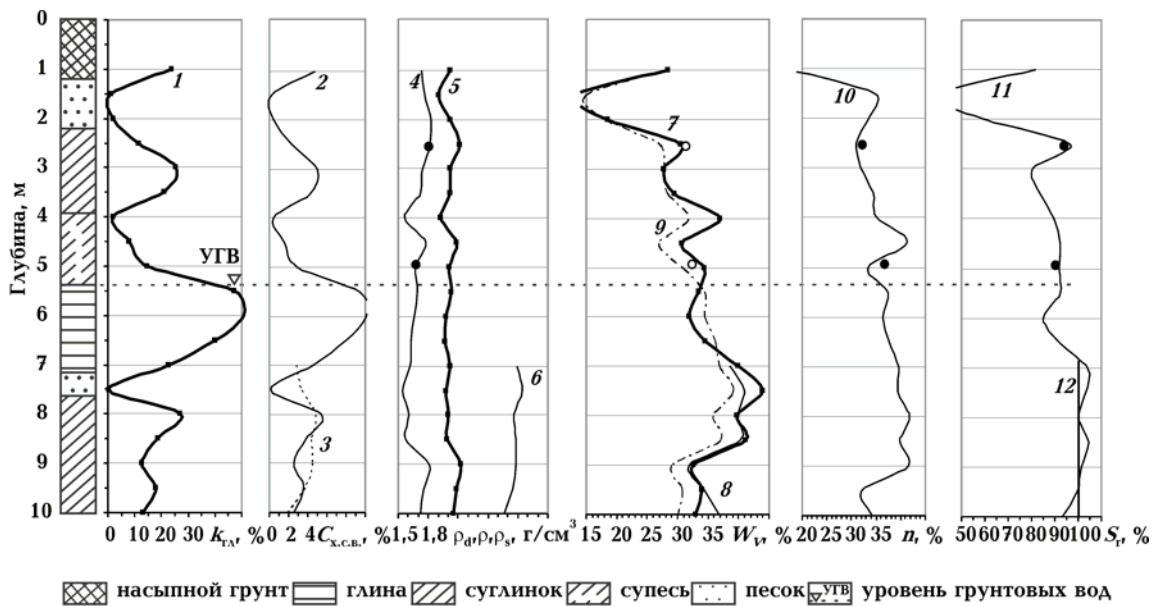


Рис. 11. Распределение параметров грунта вдоль разреза скважины № 6. Обозначения см. на рис. 6.

- водородный индекс глин

$$\omega_{\text{гл}}^{\text{PK}} = C_{\text{х.с.в.}}^{n+\gamma} / k_{\text{гл}}^{\gamma} \quad (22)$$

Среднее значение плотности твердой фазы  $\bar{\rho}_s^{\text{PK}}$  в зоне насыщения, входящее в формулу (19), получают путем усреднения данных  $\rho_s^{\text{PK}}$  в соответствии с формулой (20). Следует отметить, также, что прямое определение содержания химически связанной воды (21), а также водородного индекса (22), предъявляет высокие требования к точности значений  $W_v^n$  и  $W_v^{\gamma}$ , что не всегда достижимо.

Примеры определения указанных параметров в зоне насыщения приведены в следующем разделе.

**Комплексная интерпретация результатов радиоизотопного каротажа.** При решении задач инженерной геологии во многих случаях исследуемый скважинный разрез проходит зону аэрации и значительная его часть находится ниже уровня грунтовых вод.

На рис. 6—8 представлены результаты интерпретации данных комплекса радиоизотопного каротажа, выполненного в районе Кривого Рога с помощью приборов РК ППГР-1 и ВПГР-1 в обсаженных стальной трубой скважинах, заполненных воздухом. На рис. 9—11 — аналогичные результаты для одной из строительных площадок Киева. Ценность этих исследований имеет повышенное значение в связи с довольно представительным набором лабораторных определений ряда параметров.

Диаграммы 1 характеризуют глинистость пород и одновременно могут быть использованы для литологического расчленения разреза.

Диаграммы 2 и 3 показывают возможность определения содержания химически связанной воды в глинах геофизическими методами двумя независимыми способами (см. формулы (18) и (21)). Как следует из выполненных оценок, оба подхода, по крайней мере, не противоречат друг другу и дают реалистичные оценки величины  $C_{\text{х.с.в.}}$ . Вместе с тем разработанные способы требуют дальнейшего совершенствования.

Диаграммы 4—6 дают значения плотностей вдоль разреза скважины. Особый интерес представляет распределение 6 для плотности твердой фазы в зоне полного водонасыщения, впервые полученное с помощью комплекса геофизических методов.

Диаграммы 7—9 дают распределение объемной влажности вдоль разреза скважин. Кривые 7 и 8 в интервале полного насыщения показывают два независимых способа (см. формулы (14) и (19)) независимого определения искомого параметра. Приведенная для сравнения кривая 9, полученная с помощью стандартной методики, в целом хорошо отражает распределение влажности, однако, не позволяет более тонко учесть особенности разреза.

Диаграмма 10 показывает распределение пористости, а 11 — коэффициента влагона-

сыщения. Из рис 10 и 11 (кривая 11) видно, что комплекс РК выделяет не только зоны аэрации и полного водонасыщения, но и промежуточную зону неполного насыщения.

В целом результаты проведенной интерпретации хорошо согласуются с независимыми лабораторными данными, а разработанный комплекс для получения ряда дополнительных параметров самосогласован и достаточно информативен.

**Заключение.** Представленные исследования показывают, что возможности стандартного комплекса радиоизотопного каротажа, включающего нейтронный каротаж, гамма-гамма каротаж и гамма-каротаж, используются не в полной мере. Применяемая в настоящее время технология позволяет определять только несколько параметров грунтов. Вместе с тем скважинные ядерно-геофизические методы исследования приповерхностных горных пород имеют значительно более высокую информативность.

### Список литературы

- Арцыбашев В. А. Ядерно-геофизическая разведка. — 2-е изд. — Москва: Атомиздат, 1980. — 224 с.
- Белоусова О. Н., Михина В. В. Общий курс петрографии. — Москва: Недра, 1972. — 344 с.
- Блюменцев А. М., Калистратов Г. А., Лобанков В. М., Цирульников В. П. Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин. — Москва: Недра, 1991. — 266 с.
- Бондаренко М. С., Кармазенко В. В., Кашуба Г. А., Кулик В. В. Определение пористости глинистых пород в обсаженных нефтегазовых скважинах с помощью радиоактивного и акустического каротажа // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 2. — С. 110—120.
- ГОСТ 23061-90. Грунты. Методы радиоизотопных измерений плотности и влажности. — Введ. 1.09.1990. — Москва: Изд-во стандартов, 1990. — 35 с.
- Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А. Петрофизика (физика горных пород). — 2-е изд., перераб., доп. — Москва: ФГУП Изд. «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. — 368 с.
- ДСТУ Б В 2 1-2-96 (ГОСТ 25100-95). Грунты. Классификация. — Введ. 1.11.1996. — Київ: Укрархбудінформ, 1997. — 32 с.
- В дальнейшем необходимо выполнить детальные исследования, направленные на определение нейтронопоглощающих свойств приповерхностных пород, что имеет важное прикладное значение. Необходимо также провести научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию новых приборов с расширенными возможностями для приповерхностных исследований.
- Создание новых технологий геофизических исследований расширяет использование в Украине каротажных методов в инженерной геологии, особенно в связи с тенденцией увеличения объемов строительства и требуемой глубины скважин, а также в гидромелиоративной геологии. Применение радиоизотопного каротажа позволяет получить значительный экономический эффект за счет расширения количества определяемых параметров, повышения их точности, оперативности измерений, ускорения выполнения работ и их удешевления.
- Звольский С. Т. Гамма-методы измерения объемной массы дисперсных грунтов и донных отложений. — Москва: Атомиздат, 1980. — 112 с.
- Звольский С. Т. Радиоизотопные методы исследования физико-механических свойств донных осадков. — Киев: Наук. думка, 1984. — 216 с.
- Звольский С. Т., Кулик В. В., Месропян В. С., Черниговский Е. А., Молчановский С. Н., Майстренко И. А. Показания приборов с <sup>3</sup>He-детекторами нейтронов при исследовании природных сред // Геофиз. журн. — 1999. — 21, № 5. — С. 29—40.
- Звольський С. Т., Череповський Ю. Т. Радіоактивний каротаж щільності і вологості водонасичених пухких ґрунтів // Геол. журн. — 1965. — 25, № 6. — С. 58—62.
- Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин. Справочник / Под ред. В. М. Добрынина. — Москва: Недра, 1988. — 476 с.
- Кожевников Д. А., Козачок И. А., Кулик В. В., Яковлев Ю. В. Влияние неупругого рассеяния и поглощения быстрых нейтронов на нейтронные характеристики естественных замедлителей // Современные проблемы ядерной геофизики и геоакустики: Сб. науч. тр. — Москва: ВНИИгеоинформсистемы, 1990. — С. 57—65.

- Козачок И. А., Кулик В. В. Простые приближения в задачах геофизической нейтронметрии // Геофиз. журн. — 1981. — 3, № 3. — С. 3—15.
- Козачок И. А., Кулик В. В., Яковлев Ю. В. Простые приближения для расчета потока тепловых нейтронов в геологических средах // Геофиз. журн. — 1984. — 6, № 2. — С. 23—31.
- Кулик В. В., Звольский С. Т., Крутой А. А. Теоретическое и экспериментальное исследование показаний  $^3\text{He}$ -детекторов нейтронов в поглощающих средах // Геоинформатика. — 1998. — № 1. — С. 16—28.
- Кулик В. В. Показания газонаполненных детекторов нейтронов в однородных геологических средах // Геофиз. журн. — 1999. — 21, № 5. — С. 19—28.
- Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. — 2-е изд. перераб., доп. — Ленинград: Недра, 1984. — 511 с.
- Осинов В. И. Определение плотности и влажности грунтов по рассеянию гамма-лучей и нейтронов. — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1968. — 158 с.
- Скважинная ядерная геофизика. Справочник геофизика / Под ред. О. Л. Кузнецова, А. Л. Поляченко. — Москва: Недра, 1990. — 318 с.
- Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Влагомер поверхностно-глубинный радиоизотопный ВПГР-1. — Полтава: Изд-во «Полтава», 1982. — 43 с.
- Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Плотномер поверхностно-глубинный радиоизотопный ППГР-1. — Полтава: Изд-во «Полтава», 1986. — 60 с.
- Ферронский В. И., Данилин А. Н., Дубинчук В. Т., Гончаров В. С., Селецкий Ю. Б. Радиоизотопные методы исследования в инженерной геологии и гидрогеологии. — 2-е изд., перераб., доп. — Москва: Атомиздат, 1977. — 304 с.
- CPN International, Inc. 503DR Hydroprobe. Operating manual. — Campbell Pacific Nuclear International, Martinez, CA, 2004.
- Greacen E. L., Schrale G. The effect of bulk density on neutron meter calibration // Australian J. Soil Res. — 1976. — № 14. — P. 159—169.
- International atomic energy agency. Field estimation of soil water content. Training course series № 30. — Vienna, 2008. — 131 p.
- Pat. US 4152600, G 02 B 5/00. Nuclear radiation moisture gauge calibration standard / L. Richard Berry. Troxler Electronic Laboratories, inc. — Appl. № 734624; filed: 21.10.76. — Publ. 1.05.79. — 7 p.
- Troxler Electronic Laboratories. Manual of operation and instruction, Model 4300 Depth Moisture Gauge. — Troxler Electronic Lab. Research Triangle Park, NC, 2006.