

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**А. П. ГУСЕВ**

**ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА**

Практическое пособие

для студентов специальности

1-51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2026

УДК 550.83(076)  
ББК 26.20я73  
Г962

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук А. Н. Галкин,  
кандидат технических наук О. Б. Меженная

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Гусев, А. П.**

Г962      Инженерная геофизика : практическое пособие / А. П. Гусев ;  
Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им.  
Ф. Скорины, 2026. – 47 с.  
ISBN 978-985-32-0160-4

Практическое пособие включает рассмотрение теоретических основ инженерной геофизики, геофизических методов в инженерно-геологических исследованиях, геофизических методов в гидрогеологических исследованиях, вопросы для самостоятельной работы, а также практические работы по дисциплине «Инженерная геофизика».

Адресовано студентам специальности 1-51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

УДК 550.83(076)  
ББК 26.20я73

**ISBN 978-985-32-0160-4**

© Гусев А. П., 2026  
© Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», 2026

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ.</b>	<b>6</b>
1.1 Геологическая среда как объект инженерной геофизики ....	6
1.2 Физические свойства геологической среды.....	7
1.3 Классификация методов геофизики .....	16
<b>2 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....</b>	<b>18</b>
2.1 Общие сведения .....	18
2.2 Изучение инженерно-геологических условий.....	19
2.3 Изучение состава, строения и свойств грунтов .....	22
2.4 Изучение инженерно-геологических процессов .....	25
<b>3 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....</b>	<b>28</b>
3.1 Общие сведения .....	28
3.2 Изучение разрывных нарушений и трещиноватости, оценка водопроницаемости массивов горных пород.....	28
3.3 Изучение зоны аэрации, направления и скорости движения подземных вод.....	30
3.4 Изучение месторождений подземных вод .....	34
<b>4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ.</b>	<b>37</b>
4.1 Изучение движения грунтовых вод методом естественного электрического поля .....	37
4.2 Определение места коррозии трубопровода методами электроразведки.....	38
4.3 Определение участка разгрузки подмерзлотных вод, приуроченного к зоне тектонического нарушения .....	39
4.4 Определение направления и скорости движения подземных вод методом заряженного тела .....	41
4.5 Выявление зон развития суффозии методом инженерной гравиразведки .....	42
4.6 Картирование оползня методом инженерной гравиразведки .....	44
4.7 Изучение трещиноватости массива грунтов методом сопротивлений.....	45
Литература .....	46

## **ВВЕДЕНИЕ**

Геофизические методы широко используются для решения различных инженерно-геологических, гидрогеологических и эколого-геологических задач. Геофизические методы с начала XX века используются в инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. Они применяются для изучения современных геологических процессов, массивов грунтов, выделения водоупорных и водопроницаемых слоев в плане и по вертикали, для определения уровней залегания подземных вод, для оценки мощности водоносных горизонтов, при изучении динамики подземных вод, для изучения загрязнения геологической среды и т. д.

Дисциплина «Инженерная геофизика» входит в компонент учреждения образования и является важной дисциплиной, изучаемой студентами 4 курса специализации «Геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых» специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

Целью преподавания дисциплины «Инженерная геофизика» является формирование у студентов представления о теоретических и методических основах использования инженерно-геофизических методов. Задачи курса: изучение теоретических основ инженерно-геофизических методов; изучение геофизических методов, используемых в инженерной геологии, гидрогеологии и экологической геологии; получение представления о комплексировании геофизических методов; изучение применения геофизических методов при инженерно-геологической и гидрогеологической съемках, мониторинге инженерно-геологических процессов, оценки состояния геологической среды.

Инженерная геофизика относится к малоглубинной геофизике, которая представляет собой научно-практическое направление разведочной геофизики, занимающееся изучением приповерхностной части земной коры – геологической среды.

Малоглубинная геофизика включает множество различных направлений:

- экологическую геофизику;
- инженерную геофизику;
- гидрогеологическую геофизику;
- техническую геофизику;
- археологическую геофизику и другие.

Между указанными направлениями часто нет четких разграничений, поскольку они обусловлены различиями в изучаемых объектах. При

этом все перечисленные направления малоглубинной геофизики, решая различные задачи, используют практически одни и те же геофизические методы, методики полевых работ и аппаратуру.

Особенностями исследований малоглубинной геофизики являются:

- небольшие глубины и резкая неоднородность изучаемой геологической среды;
- влияние природных экзогенных и антропогенно-техногенных процессов;
- наличие обширного класса решаемых задач в рамках геологических и технических дисциплин (гидрогеологии, почвоведения, инженерной геологии, горного дела, мерзлотоведения, гляциологии, технических средств изучения погруженных объектов, археологии и др.) с хорошо разработанными прямыми методами исследований.

Особенностью методов исследований малоглубинной геофизики является использование полей и методов небольшой, но разной глубинности:

- геофизические методы «близкого действия» (ядерные, скважинные);
- аэрокосмические методы видимого, инфракрасного, радиотеплового и более высоких диапазонов частот (тепловые, радиометрические);
- малоглубинные методы (радиоволновые, сейсмоакустические);
- микросъемка глубинных полей (гравитационного, геомагнитного, сейсмического, постоянного электрического) на небольших участках.

При малоглубинных исследованиях используют наземные и активные геофизические методы, дистанционные методы (измерения физических полей с космических аппаратов, самолетов, вертолетов, беспилотных летательных аппаратов.

# **1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ**

## **1.1 Геологическая среда как объект инженерной геофизики**

Понятие «геологическая среда» появилось в рамках инженерной геологии в конце XX века (Инженерно-геологические аспекты..., 1981; Сергеев, 1987). В классическом понимании: геологическая среда – это верхняя часть литосферы, которая рассматривается как многокомпонентная система, находящаяся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, в результате чего происходит изменение природных геологических процессов и возникновение новых антропогенных явлений. При этом инженерная геология понималась как наука о геологической среде, ее рациональном использовании и охране в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека (Сергеев, 1982).

Геологическая среда – открытая иерархически устроенная термодинамическая система, важнейший элемент литосферы, который определяет жизнедеятельность человека и биосфера в целом. Состояние геологической среды является параметром, интегрирующим результаты воздействия различных природных и техногенных факторов. Компонентами геологической среды выступают горные породы, подземные воды, природные газы, биота, физические поля (Алексеев, Козырева, 2014).

Геологическая среда – сложная система, компонентами которой являются горные породы, подземные воды, лед, газы.

Геофизические методы основаны на изучении физических свойств компонентов и геосреды в целом.

Интерпретация геофизических методов основана на физико-геологических моделях.

Физико-геологическая модель (ФГМ) – обобщенное и формализованное описание пространственно-временной структуры геологических и геофизических полей и параметров, с определенной степенью вероятности, отражающей реальные геологические объекты.

При построении ФГМ сложные по морфологии и вещественному составу геологические тела заменяют сочетания геометрически простых объектов, ограниченных плоскостями или поверхностями второго порядка.

Описание ФГМ состоит из: 1) геометрических параметров геологических тел (размеры, форма, глубина залегания); 2) физических свойств и состояния горных пород и подземных вод; 3) особенностей физических полей; 4) влияния помех геологического и негеологического происхождения.

ФГМ создается методом последовательных приближений (итераций), путем последовательного накопления знаний об объекте исследования.

Различают: априорную и рабочую ФГМ.

Априорная ФГМ – модель, созданная на основе анализа и обобщения результатов предшествующих работ и общих теоретических соображений. Создание ФГМ требует установления взаимосвязей между геологическими и геофизическими параметрами. Априорная ФГМ используется при планировании и проектировании геофизических работ.

Рабочая ФГМ – модель, используемая при проведении полевых наблюдений и проведении интерпретации результатов. Рабочая ФГМ постоянно уточняется при поступлении новой информации.

Рабочая ФГМ содержит: 1) информацию о пространственном положении геологических тел, в том числе тектонических нарушений, геодинамически активных зон; 2) информацию о положении поверхностей и зон раздела между массивами пород, которые находятся в различном состоянии по увлажнению, деформациям и т. д.; 3) количественную характеристику физико-механических свойств геологических тел; 4) данные об условиях залегания, динамики, химическом составе, физических свойствах подземных вод; 5) характеристику состояния и динамики физико-геологических процессов и явлений; 6) распределение и интенсивность природных и техногенных физических полей; 7) результаты режимных наблюдений за физическими полями и объектами.

ФГМ характеризует общефизические свойства геологической среды: пористость, трещиноватость, глинистость, водонасыщенность, газонасыщенность, льдистость, влажность, коэффициент фильтрации, плотность.

Все перечисленные свойства влияют на физические свойства, на формирование геофизических полей.

## 1.2 Физические свойства геологической среды

*Электромагнитные свойства.* К электромагнитным свойствам относятся:

- удельная электропроводность  $\sigma$  или удельное электрическое сопротивление  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ;
- диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ;
- магнитная проницаемость  $\mu$ .

Удельная электропроводность среды характеризует ее способность проводить электрический ток, а диэлектрическая и магнитная

проницаемости – ее способность поляризоваться под действием электромагнитного поля. Под поляризацией в данном случае понимается упорядочивание зарядов микрочастиц (*диэлектрическая поляризация*) или магнитных моментов вещества (*магнитная поляризация*).

Основным электромагнитным параметром компонентов геологической среды является их удельное электрическое сопротивление ( $\text{УЭС}$ ,  $\rho$ ), которое связано с сопротивлением  $R$  линейного проводника соотношением

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

где  $L$  – длина проводника;

$S$  – площадь его поперечного сечения.

Сопротивление  $R$  образца может быть получено из отношения разности потенциалов  $\Delta U$  между противоположными гранями образца и силы тока  $I$

$$R = \frac{\Delta U}{I}.$$

Минералы по удельному электрическому сопротивлению можно разбить на три группы: 1) плохие проводники ( $\rho > 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) – почти все силикаты, кварц, кальцит, каменная соль, самородная сера, слюды, нефть; 2) средние проводники ( $\rho = 10^2 – 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) – отдельные силикаты (серпентин), карбонаты (сидерит), оксиды железа, титана и хрома (гематит, ильменит, лимонит, хромит), сульфиды (сфалерит, антимонит), бурый и каменный уголь; 3) хорошие проводники ( $\rho < 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) – самородная медь, серебро, большинство сульфидов, оксиды железа (магнетит, титаномагнетит), графит, антрацит.

Исследования корреляционных связей между УЭС и параметрами, описывающими текстурные и микроструктурные свойства горных пород, позволили построить общую формулу зависимости  $\rho$  от основных влияющих факторов:

$$\rho = P_{\pi} P_{v} P_{g} P_{t} \cdot \rho_v,$$

где  $P_{\pi}$  – параметр пористости;

$P_v$  – параметр влажности;

$P_g$  – параметр глинистости;

$P_t$  – температурный параметр;

$\rho_v$  – сопротивление поровой влаги.

Основными факторами, влияющими на удельное электрическое сопротивление геологической среды, являются минерализация подземных вод (рисунок 1), глинистость и температура.

Вторым электромагнитным свойством среды, характеризующим геологическую среду, является *диэлектрическая проницаемость*  $\epsilon$ . Ее влияние на электромагнитное поле при низких частотах (до  $10^3$ – $10^5$  Гц) обычно пренебрежимо мало, однако на более высоких частотах и в плохо проводящих разрезах характер поля определяется именно диэлектрической проницаемостью.

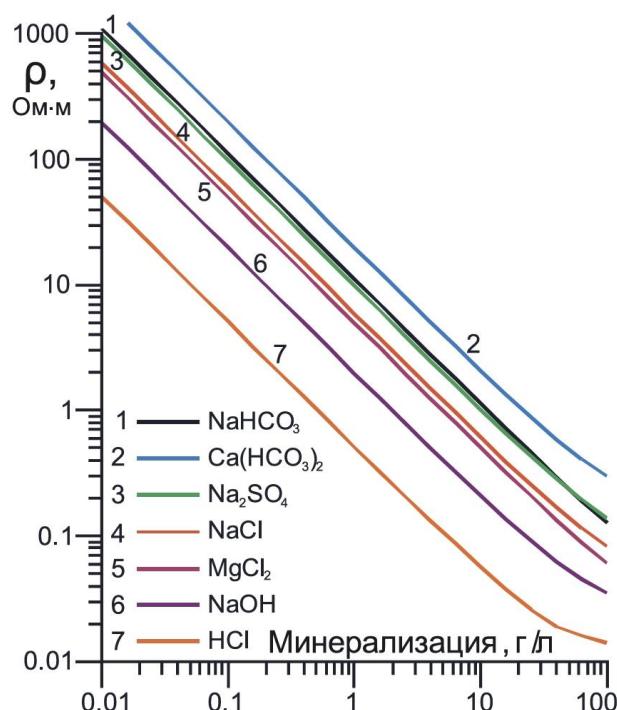


Рисунок 1 – Зависимость удельного электрического сопротивления от минерализации воды (Электроразведка: пособие..., 2013)

Различают абсолютную  $\epsilon$  и относительную  $\epsilon_{\text{отн}}$  диэлектрические проницаемости, при этом  $\epsilon = \epsilon_{\text{отн}} \epsilon_0$ , где  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – диэлектрическая проницаемость вакуума. Величина  $\epsilon_{\text{отн}}$  показывает, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия между электрическими зарядами в данной среде по сравнению с вакуумом.

Относительная  $\epsilon_0$  большинства породообразующих минералов не превышает 10. Для самородных минералов, сульфидов и окислов  $\epsilon_{\text{отн}} = 80$ –100 и более. Высокими значениями  $\epsilon_{\text{отн}}$  характеризуются лед (около 100 при  $t = -10^\circ\text{C}$ ) и вода (81 при  $t = 20^\circ\text{C}$ ). Поэтому диэлектрическая проницаемость геологической среды обусловлена ее пористостью и влажностью.

Третьим электромагнитным параметром горных пород является магнитная проницаемость  $\mu$ . При наличии внешнего магнитного поля происходит магнитная поляризация (упорядочивание магнитных моментов) вещества, что приводит к созданию вторичного магнитного поля. При этом суммарная магнитная индукция будет равна

$$B = \mu_0 (H + J),$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;

$H$  – напряженность первичного магнитного поля;

$J$  – намагниченность (магнитный момент единицы объема).

Намагниченность  $J$  зависит от величины  $H$

$$J = \kappa \cdot H,$$

где  $\kappa$  (каппа) – магнитная восприимчивость среды.

Соответственно имеем

$$B = \mu_0 (1 + \kappa) \cdot H = \mu H,$$

где  $\mu = \mu_0 (1 + \kappa)$  – абсолютная магнитная проницаемость.

На практике обычно используют относительную магнитную проницаемость  $\mu_{\text{отн}} = 1 + \kappa$ .

По магнитным свойствам большинство минералов делят на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Основное влияние на магнитные свойства геологической среды оказывают ферромагнитные минералы (магнетит, титаномагнетит, пирротин, металлические сплавы железа, никеля, кобальта).

Поскольку геологическая среда многокомпонентна и гетерогенна, то важную роль играют такие электромагнитные свойства, как:

- естественная электрохимическая активность среды  $\alpha$  – способность породы поляризоваться под действием различных природных процессов;

- вызванная поляризуемость среды  $\eta$  – способность породы поляризоваться при протекании через среду электрического тока.

В результате неоднородности геологической среды и протекающих в ней различных естественных физико-химических процессов внутри горных пород накапливаются электрические заряды, которые, подобно природным гальваническим элементам, возбуждают естественное электрическое поле (естественная поляризация). Вызванной поляризацией (ВП) называется процесс накопления вторичных зарядов в горной породе при

пропускании через нее электрического тока. Эффект ВП приводит к возникновению вторичных токов  $j_{\text{ВП}}$ , прямо пропорциональных первичному («поляризующему») току  $j$ , однако текущих во встречном направлении, то есть  $j_{\text{ВП}} = -\eta \cdot j$ . Коэффициент пропорциональности  $\eta$  называется поляризуемостью и характеризует интенсивность процессов вызванной поляризации.

**Упругие свойства геологической среды.** Упругие свойства влияют на скорость распространения упругих волн, которая используется в геофизических методах.

По закону Гука малые деформации пропорциональны приложенной нагрузке. В качестве характеристики упругой среды используют модуль Юнга – характеризует способность тел сопротивляться деформациям растяжения или сжатия

$$E = p \frac{\Delta l}{l},$$

где  $p$  – нормальное растяжение;

$\frac{\Delta l}{l}$  – относительное удлинение.

Для горных пород модуль Юнга составляет от  $0,15 \cdot 10^{-4}$  до  $0,6 \cdot 10^{-5}$ .

Еще один важный показатель: коэффициент Пуассона ( $v$ ) – абсолютное значение отношения относительной поперечной деформации к относительной продольной деформации

$$v_{yx} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}, v_{zx} = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x},$$

где  $\epsilon_y, \epsilon_x, \epsilon_z$  – деформации по соответствующим осям.

Для большинства пород  $v > 0,5$ .

Модуль сдвига – показатель способности тел сопротивляться изменению формы при сохранении объема

$$G = \frac{r}{\alpha},$$

где  $r$  – касательное напряжение;

$\alpha$  – угол сдвига.

Теория распространения упругих (сейсмических) волн базируется на теории упругости, так как геологические среды в первом приближении

можно считать упругими. Установлено, что под действием внешних нагрузок жидкые и газообразные тела изменяют свои объем и форму, деформируются. При деформации частицы тела смещаются относительно друг друга и исходного положения. Величина и направление перемещений определяются величиной и характером внешних сил и свойствами тела. Положение частиц тела после деформации можно найти, если известен вектор перемещений  $U(x, y, z)$ , отнесенный к исходному положению частиц.

При одноосном сжатии (растяжении) призмы из твердого тела относительное изменение ее длины вдоль направления действующего напряжения выражается соотношением

$$\Omega = E \frac{\Delta l}{l},$$

где  $\Omega$  – величина внешней нагрузки;

$E$  – модуль Юнга;

$l$  – длина призмы;

$\Delta l$  – изменение длины.

Модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\delta$  полностью определяют упругие свойства изотропных сред. Для анизотропных сред при неизменной осевой нагрузке относительные удлинения ребер призмы будут зависеть от того, как была ориентирована ось призмы в породе, т. е. упругие свойства зависят от направления внешних нагрузок. Изотропные тела можно описать с помощью упругих констант Ламэ – модуля сжатия  $\lambda$  и модуля сдвига  $\mu$ . Эти модули связаны с модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\delta$  формулами

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu},$$

$$\delta = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}.$$

Деформации, возникающие в телах под действием механических напряжений, вызывают упругие волны.

Упругие волны бывают продольные ( $P$ ) и поперечные ( $S$ ). Продольные волны возникают при деформациях растяжения-сжатия. Поперечные волны возникают при деформациях формы (могут существовать только в твердых телах).

Связь между скоростями упругих волн и характеристиками упругости описывают формулы

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\sigma}}, v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}},$$

где  $\sigma$  – плотность.

Поскольку  $\lambda$  и  $\mu$  положительны, скорость продольных волн всегда выше скорости поперечных.

На свободной поверхности среды возникает особый вид колебаний – поверхностная волна или волна Рэлея ( $R$ ). При прохождении такой волны частицы среды перемещаются по эллиптической траектории. Установлено, что  $V_R = 0,9V_s$ .

Факторами, определяющими величины скоростей упругих волн в геологической среде, являются: минеральный и породный состав, объем и форма пор, степень заполнения пор жидкостями и газом, давление, температура и т. д.

Скорости упругих волн тесно коррелируют с плотностью пород. В общем случае эта связь описывается формулой

$$\sigma = 0,23 \cdot V_p^{0,25}.$$

Это соотношение используют для грубой оценки плотности по скоростным характеристикам, полученным при акустическом каротаже скважин.

На динамику упругих волн в реальных средах большое влияние оказывает степень поглощения сейсмической энергии. Поглощение вызывается потерями упругой энергии за счет необратимых процессов в среде вследствие ее неидеальной упругости и описывается формулой

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x},$$

где  $A$  – амплитуда;

$x$  – расстояние;

$A_0$  – начальная амплитуда;

$\alpha$  – амплитудный коэффициент поглощения.

Амплитудный коэффициент поглощения различен для разных пород. Он возрастает с ростом пористости, трещиноватости пород с уменьшением глубины их залегания и водонасыщенности.

**Термические свойства геологической среды.** Термические свойства геологической среды:  $\lambda$  – удельная теплопроводность;  $\xi$  – тепловое сопротивление; С – теплоемкость; а – температуропроводность; Q – тепловая инерция.

Их взаимосвязи описывают формулы

$$a = \frac{\lambda}{C} \cdot \sigma,$$

где  $\sigma$  – плотность.

$$Q = (\lambda \cdot C \cdot \sigma)^{\frac{1}{2}}.$$

$$\lambda = \frac{1}{\xi}.$$

Основным параметром является теплопроводность, характеризующая способность сред и горных пород передавать тепло. Теплопроводность горных пород зависит от минерального состава, структуры, текстуры, плотности, пористости, влажности, температуры. Минеральный состав магматических, метаморфических и осадочных пород не очень влияет на их теплопроводность. Плотность, пористость и давление, под которым находятся горные породы, связаны между собой. При повышении плотности и давления, а значит понижении пористости теплопроводность пород повышается. С увеличением влажности горных пород их теплопроводность резко увеличивается. Например, изменение влажности с 10 до 50 % может увеличить теплопроводность в 2–4 раза. Повышение температуры снижает теплопроводность кристаллических и сухих осадочных пород и увеличивает у водонасыщенных.

Теплоемкостью горных пород объясняется их способность поглощать тепловую энергию. Она отличается сравнительным постоянством и возрастает с увеличением водонасыщенности. Температуропроводность характеризует скорость изменения температур при поглощении или отдаче тепла. Тепловая инерция пород [Дж/(м<sup>2</sup>·с<sup>1/2</sup>·К), где К – градусы Кельвина] является одной из обобщенных тепловых характеристик земной поверхности. Она используется при тепловых аэрокосмических съемках и характеризует суточный ход температур над разными ландшафтами и горными породами.

**Ядерно-физические свойства геологической среды.** Естественная радиоактивность, т. е. самопроизвольный распад неустойчивых атомных

ядер, спонтанно превращающихся в ядра других элементов, сопровождается испусканием альфа-, бета-частиц, гамма-квантов и другими процессами. Известно более 230 радиоактивных изотопов различных элементов, называемых радиоактивными нуклидами или радионуклидами. Радиоактивность тяжелых элементов с порядковым номером в таблице Менделеева, большим 82, сводится к последовательным превращениям одних элементов в другие и заканчивается образованием устойчивых нерадиоактивных изотопов. Основными радиоактивными рядами или семействами тяжелых элементов являются ряды урана-238, урана-235, тория-232.

Количество и концентрация долгоживущих элементов ( $U$ ,  $Th$ ,  $40K$ ) в горной породе определяются их массой и процентным содержанием (или эквивалентным содержанием урана).

Абсолютной единицей радиоактивности радионуклидов в СИ является беккерель ( $1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад в секунду}$ ). Единицей удельной радиоактивности в СИ служит беккерель на единицу массы или объема. За единицу экспозиционной дозы облучения в СИ принят кулон на килограмм ( $\text{Кл}/\text{кг}$ ) и внесистемная единица – рентген ( $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/\text{кг}$ ). Мощность дозы, т. е. облучение за единицу времени, в радиометрии выражают в амперах на килограмм ( $A/\text{кг}$ ), микрорентгенах в час ( $\mu\text{Р/ч}$ ).

Радиоактивность горных пород и руд тем выше, чем больше концентрация в них естественных радиоактивных элементов семейств урана, тория, а также калия-40. По радиоактивности (радиологическим свойствам) породообразующие минералы подразделяют на четыре группы: 1) минералы урана (уранит, настуран, карбонаты, фосфаты, сульфаты уранила и др.), тория (торианит, торит, монацит и др.) – наибольшая радиоактивность; 2) минералы, содержащие калий-40 (полевые шпаты, калийные соли), – высокая радиоактивность; 3) магнетит, лимонит, сульфиды – средняя радиоактивность; 4) кварц, кальцит, гипс, каменная соль – низкая радиоактивность. В этой классификации радиоактивность соседних групп возрастает примерно на порядок.

Радиоактивность горных пород определяется, прежде всего, радиоактивностью породообразующих минералов. В зависимости от качественного и количественного состава минералов, условий образования, возраста и степени метаморфизма их радиоактивность изменяется в очень широких пределах.

С радиоактивностью горных пород тесно связана радиоактивность природных вод и газов. В целом в гидросфере и атмосфере содержание радиоактивных элементов ничтожно мало. Подземные воды могут иметь разную радиоактивность. Особенно велика она у подземных вод радиоактивных месторождений и вод сульфидно-бариевого и хлоридно-кальциевого

типов. Радиоактивность почвенного воздуха зависит от количества эманаций таких радиоактивных газов, как радон, торон, актинон. Ее принято выражать коэффициентом эманирования пород (СЭ), являющимся отношением количества выделившихся в породу эманаций (в основном радона) к общему количеству эманаций. В массивных породах СЭ = 5–10 %, в рыхлых трещиноватых СЭ = 40–50 %.

Под ядерно-физическими (гамма- и нейтронными) свойствами горных пород понимают их способность по-разному рассеивать, замедлять и поглощать гамма-кванты или нейтроны разных энергий.

## 1.3 Классификация методов геофизики

Существуют различные классификации геофизических методов.

Существуют разные подходы к их классификации: 1) по геофизическим полям; 2) по технологиям и месту проведения работ; 3) по прикладным направлениям и решаемым задачам; 4) по видам деятельности.

В зависимости от используемых геофизических полей различают:

- гравитационную разведку (гравиметрию);
- магниторазведку (магнитометрию);
- сейсморазведку (сейсмометрию);
- электроразведку (электрометрию, геоэлектрику);
- терморазведку (термометрию);
- ядерную геофизику.

*Гравиразведка (гравитационная разведка, гравиметрия)* – метод геофизики, изучающий изменение ускорения свободного падения в связи с изменением плотности геологических тел.

*Магниторазведка (магнитная разведка, магнитометрия)* – метод геофизики, основанный на изучении пространственных изменений геомагнитного поля, возникающих вследствие различной намагниченности горных пород и руд, техногенных объектов.

*Сейсморазведка (сейсмическая разведка, сейсмометрия)* – это метод геофизики, основанный на изучении характеристик поля упругих колебаний.

*Электроразведка (геоэлектрика, электрометрия)* – метод геофизики, основанный на изучении естественных и искусственных электромагнитных полей.

*Терморазведка (термическая разведка, геотермия)* – метод геофизики, основанный на изучении распределения теплового поля Земли.

*Ядерно-геофизическая разведка* – совокупность методов геофизики, использующих радиоактивные излучения.

По способу проведения работ геофизические исследования подразделяются на технологические комплексы:

- аэрокосмические (дистанционные);
- полевые (наземные);
- акваториальные (аквальные, океанические, морские, речные);
- подземные (шахтно-рудничные);
- геофизические исследования скважин (ГИС).

Иногда дистанционные методы изучения Земли с помощью самолетов, вертолетов, искусственных спутников, пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций не считают геофизическими, поскольку при этих работах преобладают съемки в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн (фото- и телевизионные съемки). Однако кроме таких визуальных наблюдений все чаще используются дистанционные методы невидимого диапазона электромагнитных волн: инфракрасные, радиолокационные (радарная и радиотепловая), радиоволновые, ядерные, магнитные и другие съемки, которые являются сугубо геофизическими.

## **Вопросы для самоконтроля**

- 1 Что такое геологическая среда?
- 2 Дайте характеристику электромагнитных свойств геологической среды.
- 3 Дайте характеристику упругих свойств геологической среды.
- 4 Дайте характеристику термических свойства геологической среды.
- 5 Дайте характеристику ядерно-физических свойств геологической среды.
- 6 Как классифицируют методы геофизики в зависимости от используемых геофизических полей?
- 7 Как классифицируют методы геофизики по способу проведения работ?

## **2 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

### **2.1 Общие сведения**

Геофизические исследования при инженерно-геологических изысканиях являются самостоятельным видом работ согласно п. 5.1 СП 11-105-97 (часть I). В соответствии с п. 5.7 СП 11-105-97 (часть I) они выполняются на всех стадиях (этапах) проектирования в сочетании с другими видами инженерно-геологических работ с целью:

- определения геологического строения массива горных пород;
- выявления тектонических нарушений, в том числе активных, зон повышенной трещиноватости и обводненности;
- определения глубины залегания уровня подземных вод, водоупоров, направления движения потоков подземных вод, а также гидрогеологических параметров грунтов и водоносных горизонтов;
- определения состава, состояния и свойств грунтов в массиве и их изменений во времени;
- выявления и изучения геологических процессов и их изменений во времени;
- проведения мониторинга опасных геологических и инженерно-геологических процессов;
- сейсмического микрорайонирования территории.

Геофизические методы используются на всех этапах инженерно-геологических изысканий:

- на этапе обоснования проектов строительства;
- на этапе строительства;
- на этапе наблюдения за работой инженерных сооружений.

Использование геофизики на стадии проектирования наиболее сложившееся направление (с 1920-х гг.), на которое приходится до 80 % общего объема инженерно-геофизических работ (по А. А. Огильви, 1990).

При изысканиях для разработки предпроектной документации на больших площадях (трассах значительной протяженности), в районах с развитием опасных инженерно-геологических процессов и в особых условиях (шельф, подрабатываемые и урбанизированные территории), а также при мониторинге возможных изменений геологической, геокриологической и экологической обстановки геофизические исследования рекомендуется выполнять в составе первоочередных работ.

На стадии проектирования геофизика используется для построения модели участка будущего строительства, для изучения свойств горных пород, для гидрогеологических исследований, для изучения экзогенных геологических процессов, для разведки месторождений строительных материалов, для археологических исследований.

## 2.2 Изучение инженерно-геологических условий

*Изучение в плане и разрезе положения геологических границ.* Определение основано на скачкообразном изменении (сверху вниз) скоростей продольных и поперечных волн, удельных электрических сопротивлений (УЭС) и плотности контактирующих пород. Основными методами исследования являются: сейсморазведка методом преломленных (МПВ) и отраженных (МОВ) волн, электроразведка постоянным током в модификациях вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), частотных электромагнитных зондирований (ЧЭМЗ) и зондирований становлением поля (ЗСП). Все виды геофизического профилирования входят в состав вспомогательных методов. При наличии скважин в комплексе должны использоваться те виды каротажа, которые фиксируют указанные различия контактирующих грунтов по перечисленным выше свойствам. Данные каротажа, лабораторных и параметрических измерений на образцах, керне и на обнажениях используются для более точной интерпретации результатов наземных наблюдений.

*Расчленение разреза скальных и дисперсных пород на слои различного литолого-петрографического состава* основано на различии пород по их физическим свойствам. Основными геофизическими методами решения этой задачи являются: электроразведка (ВЭЗ, ЗСП), сейсморазведка (МПВ и МОВ), непрерывное сейсмическое профилирование (НСП) на акваториях, радиоволновое просвечивание (РВП) и большинство видов каротажа. Роль вспомогательных методов могут играть частотное электромагнитное зондирование (ЧЭМЗ), вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), методы вызванной поляризации (ВП) и георадиолокационное зондирование (РЛЗ).

*Определение мощности коры выветривания (экзогенной трещиноватости).* В основе решения задачи лежит отличие сохранных пород от выветрелых (трещиноватых) по удельным электрическим сопротивлениям, скоростям упругих волн и коэффициентам их затухания, а также поляризуемости и плотности. Основными и вспомогательными методами являются практически те же, что и в предыдущих случаях.

*Определение глубины залегания водоупоров и их целостности.* Физические основы решения задачи и методы ее решения аналогичные вышеуказанным.

*Определение глубины залегания подземных вод (уровня грунтовых вод) и мощности водоносных горизонтов в обломочных и трещиноватых скальных и полускальных породах.* Основное отличие водонасыщенных пород от неводонасыщенных в электрических свойствах. Оно проявляется в том, что первые характеризуются существенно более низкими значениями УЭС и более высокими значениями диэлектрической проницаемости. Наибольшие различия наблюдаются в песках, галечниках, трещиноватых скальных породах и значительно меньше – в дисперсных породах, содержащих большое количество частиц глинистой фракции, а также в нетрещиноватых скальных породах. Скорости распространения продольных упругих волн на границе водонасыщенных и неводонасыщенных пород претерпевают скачкообразное увеличение, при этом скорости поперечных волн изменяются не так резко. Основными геофизическими методами решения задачи являются: электrorазведка постоянным током в модификациях вертикальных электрических зондирований методом сопротивления (ВЭЗ) и вызванных потенциалов (ВЭЗ ВП), сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), а также РЛЗ. Для количественных оценок содержания воды может быть использован метод протонного магнитного резонанса (ПМР).

*Определение глубины залегания, мощности и распространения линз и горизонтов засоленных вод.* Главной отличительной особенностью засоленных вод (растворов) является значительное понижение их УЭС при увеличении концентрации и незначительная изменчивость остальных характеристик. Основным геофизическим методом решения этой задачи является ВЭЗ. В качестве вспомогательных методов используются ВЭЗ ВП, ЧЭМЗ, ЗС, РВП.

*Определение в плане и разрезе положения границ мерзлых и немерзлых пород.* Переход пород, содержащих в своем составе воду, в мерзлое состояние сопровождается скачкообразным увеличением их УЭС и скоростей упругих волн, величина которого тем больше, чем больше свободной воды содержится в породе. Основными методами являются электrorазведка методом сопротивлений в различных модификациях, частотные методы зондирования и профилирования – ЧЭМЗ, дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП), РВП, РЛЗ и сейсморазведка. Вспомогательными являются метод ВЭЗ ВП, ЕП, метод радиокип.

*Определение глубины залегания и мощности внутригрунтовых льдов и льдов, залегающих с поверхности.* Лед наряду с мерзлыми песками

характеризуется большими значениями УЭС и скоростями упругих волн, меньшей плотностью и меньшей диэлектрической проницаемостью по сравнению с влагонасыщенными породами. В отличие от слабомагнитных глин лед практически немагнитен. Основными методами исследования внутригрунтовых льдов являются те же методы, что и в предыдущем случае. Возможность использования сейсморазведки МОВ обусловлена существованием отличия акустической жесткости льда от вмещающих пород. Вспомогательные методы – гравиразведка и магниторазведка – используются в случае достаточно крупных скоплений льда. Основными методами определения мощности ледников и крупных наледей являются радиолокационное зондирование и сейсморазведка (МПВ и МОВ).

*Выявление и оконтуривание зон повышенной трещиноватости, тектонических нарушений и активных разрывных структур.* Основным способом наблюдений является профилирование. В качестве основных методов исследования используются: ЭП, ВЭЗ, МПВ, МОВ, ДЭМП, гравиразведка, магниторазведка, а в качестве вспомогательных – ВСП, НСП, каротаж скважин, ЧЭМЗ, РЛЗ, ВЭЗ ВП, РВП.

*Обнаружение и оконтуривание в плане и разрезе карстовых полостей и подземных выработок.* Основными методами являются: ВЭЗ, ВИЭП, РВП, МПВ, ОГТ, СП, микрографиразведка, РЛЗ. В качестве вспомогательных методов применяются ЕП, резистивиметрия, МЗТ, ЕИЭМЗ.

*Определение в плане и разрезе положения границ загрязненных пород (в том числе радиоактивными веществами).* Выбор методов осуществляется на основе априорного знания свойств пород, претерпевших изменения и степени изменений. Целесообразно выполнение специальных параметрических измерений. Выбранные методы в зависимости от конкретных задач используются в модификациях зондирования или профилирования. При загрязнении радиоактивными веществами основным методом является радиометрическая съемка.

*Локализация мест разгрузки подземных и техногенных вод, мест фильтрации вод через земляные сооружения.* Выход подземных вод на поверхность и все процессы фильтрации сопровождаются появлением естественных потенциалов, как правило, положительных в местах разгрузки. Основными методами являются: резистивиметрия, ЕП, термометрия, ВЭЗ ВП; РВП, а вспомогательными – ЭП, МПВ.

*Локализация мест коррозии или опасности коррозии подземных металлических сооружений.* Решение задачи локализации мест коррозии основано на появлении в этих местах аномальных электрических потенциалов электрохимического генезиса. Основным методом является профилирование или съемка методом ЕП. Наличие блуждающих токов

в земле определяется с помощью измерения разности потенциалов между двумя точками на поверхности земли при разносе измерительных электродов равном 100 м, располагающихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях через каждые 1 000 м трассы. Замеры производятся через каждые 5–10 с в течение 10–15 мин.

*Обнаружение и локализация в плане и разрезе отдельных технических объектов (инженерных коммуникаций, погребенных фундаментов и пр.).* Выбор методов осуществляется на основе априорных знаний о свойствах искомого объекта. Наиболее информативными могут быть РЛЗ, микромагнитная съемка, ЕП, ДЭМП, ДИП.

## 2.3 Изучение состава, строения и свойств грунтов

*Определение литолого-петрографического состава пород.* Решение задачи основано на зависимости электрических, упругих и других физических свойствах пород, определяемые при геофизических исследованиях, от их литолого-петрографического состава. Установление зависимостей между геофизическими параметрами и литолого-петрографическими признаками состава грунтов проводится при использовании параметрических измерений в скважинах, горных выработках, на образцах и на обнажениях. Основными геофизическими методами при решении задачи являются электrorазведка на постоянном токе, ВЭЗ, ВЭЗ ВП, сейсморазведка МПВ на продольных и поперечных волнах. При наличии скважин используются ВСП, сейсмопросвечивание, различные виды каротажа.

*Определение трещиноватости и пористости скальных пород.* Решение задачи основано на различии скоростей распространения продольных и поперечных волн и электросопротивления в скальных породах при различной степени трещиноватости. С помощью сочетания сейсморазведки в наземном и скважинном вариантах с ультразвуковыми измерениями скоростей упругих волн в образцах (керне) скальных пород определяется общая пустотность (пористость) пород как в зоне аэрации, так и в зоне полного водонасыщения. Применение электrorазведки требует установление корреляционных связей УЭС со степенью трещиноватости и пористости пород путем измерения электрических свойств пород в полевых условиях и в лаборатории на образцах. Основными геофизическими методами при решении задачи является наземная сейсморазведка МПВ на продольных и поперечных волнах, скважинная сейсморазведка методами ВСП и просвечивания между скважинами, УЗК, измерения скоростей упругих волн в образцах пород. Вспомогательными методами являются электrorазведка ВЭЗ и КВЭЗ.

*Определение водно-физических свойств пород.* Оценка коэффициента фильтрации дисперсных пород производится по корреляционным зависимостям между коэффициентом фильтрации пород и их удельным электрическим сопротивлением, а также поляризаемостью и диэлектрической проницаемостью, устанавливаемым для конкретных условий. В скальных породах такие зависимости устанавливаются между коэффициентом фильтрации и скоростью продольных волн.

*Определение деформационных и прочностных свойств скальных пород.* Задача решается, как правило, с помощью комплекса сейсмоакустических методов. Для определения статического модуля упругости, модуля деформации, предела прочности на одноосное сжатие используются установленные корреляционные зависимости между указанными параметрами с одной стороны и скоростями продольных и поперечных волн и динамическими модулями упругости – с другой. Скорости упругих волн и, следовательно, упругие модули (с использованием информации о плотности пород в массиве) определяются: в скважинах методами сейсмоакустического каротажа и просвечивания, ВСП, с поверхности – сейсморазведкой МПВ на продольных и поперечных волнах, в лаборатории – путем измерения скоростей ультразвуковых волн в образцах.

*Определение физических свойств дисперсных пород (плотности, влажности, пористости).* Основными методами определения плотности и влажности дисперсных пород (в том числе мерзлых) являются радиоизотопные измерения. Вспомогательными методами являются сейсморазведочные и электроразведочные, результаты которых используются для определения искомых параметров грунта по установленным корреляционным зависимостям между плотностью, влажностью и пористостью с одной стороны и скоростями упругих волн и электросопротивлением – с другой. В качестве основных методов используются каротажные методы ГГМ, ННМ, а в качестве косвенных – наземная и скважинная сейсморазведка на продольных и поперечных волнах (МПВ, ВСП, сейсмопросвечивание), а также электроразведка ВЭЗ, каротаж КС и РВП.

*Определение прочностных и деформационных свойств дисперсных (тальных и мерзлых) пород* выполняется по установленным или уточненным и вновь устанавливаемым в процессе работ корреляционным зависимостям между указанными величинами и упругими параметрами: скоростями упругих волн, модулями упругости, сдвига, динамическим коэффициентом Пуассона. Скорости продольных и поперечных волн пород в полевых условиях определяются с помощью наблюдений с поверхности и во внутренних точках среды методами МПВ, ВСП, СП. В лабораторных условиях используются ультразвуковые измерения на образцах.

*Изучение строения скальных массивов, состоящих из разновеликих зон, блоков и элементов и степени их неоднородности выполняется с помощью разночастотных сейсмоакустических методов, позволяющих определять скорости продольных и поперечных волн для различных по размерам блоков и элементов массива. Для количественной оценки неоднородности строятся так называемые масштабные кривые, отражающие взаимосвязь между скоростями упругих волн и изучаемыми размерами (линейными или объемными) среды. Скорости продольных и поперечных волн в массиве и его частях определяются с помощью наблюдений с поверхности, во внутренних точках среды и на образцах методами МПВ, ВСП, СП на частотах от 50–100 Гц до 10–20 кГц, а также с помощью ультразвуковых исследований. Изучение степени неоднородности массивов дисперсных пород проводится путем построения кривых распределения скоростей упругих волн и характеристик их поглощения, а также электросопротивлений в зависимости от масштаба изучаемой среды. Методы получения упругих и электрических параметров – МПВ, ВСП, сеймопросвечивание, ВЭЗ, РВП. Изучение напряженного состояния пород основано на взаимосвязи параметров упругих волн со значениями действующих напряжений в массиве и на зависимости уровня акустической и электромагнитной эмиссии от изменений напряженного состояния массива. При качественном изучении напряженного состояния скальных и дисперсных пород используются МПВ, ВСП, сеймопросвечивание, измерение акустической и электромагнитной эмиссии.*

*Определение минерализации подземных вод и засоленности дисперсных пород производится с помощью методов резистивиметрии и электrorазведки ВЭЗ, каротажа КС и РВП. Полученные этими методами значения УЭС используются для определения минерализации подземных вод, засоленности дисперсных талых и мерзлых пород.*

*Определение льдистости дисперсных пород проводится по установленным корреляционным зависимостям между объемной льдистостью с одной стороны и скоростями упругих волн и электросопротивлением – с другой, полученными для различных видов дисперсных грунтов. Существуют корреляционные зависимости между электрическим сопротивлением, поляризуемостью, скоростями упругих волн и льдистостью пород. Так, например, льдистость можно определить по формуле*

$$\Lambda = a \cdot \lg \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

где  $\Lambda$  – льдистость волях единицы;

$a$  – коэффициент, зависящий от литологического состава;

$\rho$  – сопротивление пород при льдистости;  
 $\rho_0$  – сопротивление пород при нулевой льдистости.

Методы геофизики, изучающие льдистость: ВЭЗ-ВП, КВЭЗ, электротомография, радиолокация. Скорости продольных волн и электросопротивление пород для интерпретации результатов полевых работ определяют с помощью ультразвукового каротажа и каротажа КС и РВП.

## 2.4 Изучение инженерно-геологических процессов

*Наблюдение за изменением уровня подземных вод*, как правило, проводится с помощью сейсморазведки МПВ и электроразведки ВЭЗ, а также метода протонного магнитного резонанса ПМР. В качестве вспомогательного метода применяется ВЭЗ ВП и РЛЗ.

*Определение направления и скорости движения подземных вод, обнаружение мест разгрузки подземных вод, утечек бытовых и промышленных вод* осуществляется с помощью режимных наблюдений методами резистивиметрии, расходометрии в одной или нескольких скважинах, а также с использованием гидрогеологического варианта МЗТ.

*Наблюдение за влажностным режимом дисперсных пород зоны аэрации* выполняется при контроле качества искусственных грунтов воздвигнутых земляных сооружений. Оно осуществляется методами, позволяющими оценивать влажность пород в коренном залегании – радиоизотопными и электрометрическими.

*Наблюдение за изменением глубины сезонного и техногенного промерзания и протаивания дисперсных и скальных пород* должно осуществляться по методике режимных измерений, с применением в качестве основных методов – ВЭЗ, МПВ, ВСП, различных видов каротажа, термометрии, РВП, а также вспомогательных – ПС, ЧЭМЗ, РЛЗ.

*Наблюдение за изменением напряженного состояния, возникновением и развитием трещин* производится наиболее эффективно с помощью сейсмометрических методов – МПВ, ВСП, сейсмического просвечивания, методом акустической эмиссии, а также с привлечением различных видов каротажа, резистивиметрии в скважинах и водоемах, гравиметрии. В качестве вспомогательных методов рекомендуется использовать ЕИЭМПЗ и ЕП.

*Выявление, наблюдение и прогноз оползней.* При исследованиях процессов оползнеобразования с помощью геофизических методов могут решаться следующие задачи: локализация мест нарушения сплошности массивов горных пород (методы электроразведки и сейсморазведки

в модификациях векторных наблюдений и каротажа скважин, газово-эмиссионная съемка, гравиразведка, метод акустической эмиссии); определение времени начала смещений и его прогноз (те же методы в модификациях высокоточных режимных наблюдений); определение скоростей и величины смещений (режимные профильные и скважинные работы различными методами при геодезической привязке точек наблюдения). Пример использования геофизических методов при изучении строения оползня показан на рисунке 2.

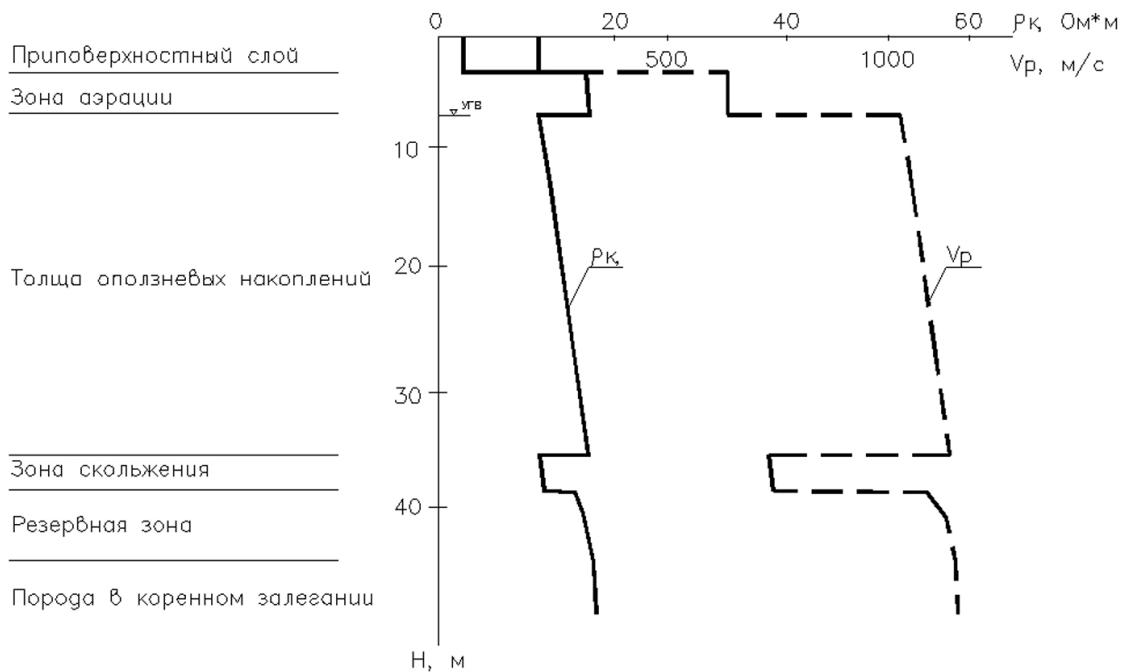


Рисунок 2 – Физико-геологическая модель оползня (Бурлуцкий, Кудашев, 2018)

Особенности методик геофизических работ при изучении оползней: 1) густая сеть наблюдений; 2) максимально сжатые сроки наблюдений (для избегания ошибок, непосредственно связанных с оползневым процессом); 3) комплексирование наземных наблюдений со скважинными; 4) выполнение режимных наблюдений (для решения задачи пространственной локализации оползня – 3–4 цикла наблюдений; для изучения временной динамики оползня – длительные наблюдения).

*Изучение суффозионных и карстовых процессов.* Геофизические методы в этом случае решают следующие задачи: выделение и изучение свойств массивов растворимых пород; оценка экранирующих водоупоров, перекрывающих растворимые породы; определение положения местных и региональных водоупоров; изучение тектонических структур, влияющих на развитие карста (суффозии); изучение гидрогеологических условий,

влияющих на развитие карста (суффозии); картирование карстовых полостей; изучение заполнителя карстовых (суффозионных) полостей; разработка физико-геологических моделей карстовых (суффозионных) полостей; оценка закарстованности территорий; мониторинг карстовых (суффозионных) процессов. Геофизический комплекс для изучения таких процессов состоит из следующих методов: ЭП+ЕП и 2D-электротомография; круговые ВЭЗ и ЭП; МПВ и МОГТ; высокоточная гравиразведка; скважинные методы; сейсмопросвечивание и радиопросвечивание.

## **Вопросы для самоконтроля**

- 1 Назовите типичные задачи, решаемые геофизическими методами при инженерно-геологических изысканиях.
- 2 Как используются геофизические методы при изучении инженерно-геологических условий?
- 3 Как используются геофизические методы при изучении состава, строения и свойств грунтов?
- 4 Как используются геофизические методы при изучении инженерно-геологических процессов?

# **3 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

## **3.1 Общие сведения**

В гидрогеологических исследованиях геофизическими методами решаются следующие задачи:

- выявление разрывных нарушений, изучение трещиноватости;
- изучение водно-физических и физико-механических свойств горных пород;
- определение водопроницаемости массивов горных пород;
- изучение условий залегания и движения подземных вод в зоне аэрации и полного водонасыщения;
- выделение водоупорных и водоносных горизонтов на латерали и вертикали;
- определение уровней залегания подземных вод и оценка мощности водоносных горизонтов;
- детально расчленение разреза буровых скважин с выделением водоупорных и проницаемых интервалов;
- изучение динамики подземных вод;
- изучение физических и химических свойств подземных вод;
- изучение месторождений подземных вод;
- изучение гидрогеологических условий месторождений твердых полезных ископаемых;
- изучение экзогенных геологических процессов и явлений, связанных с подземными водами.

## **3.2 Изучение разрывных нарушений и трещиноватости, оценка водопроницаемости массивов горных пород**

Разрывные нарушения характеризуются резким изменением свойств горных пород, напряженно-деформированного состояния, гидрогеологических условий. Важное значение имеет глубина залегания нарушения, контрастность пород зоны нарушения и вмещающей среды и т. д. Геофизические аномалии могут также возникать за счет подъема глубинных вод и газов. Для выявления разрывных нарушений используется электроразведка (линейные аномалии пониженного сопротивления),

гравиразведка (линейные отрицательные аномалии  $\Delta g$  класса «уступ»), магниторазведка (резкие изменения простирания аномальных зон, смена ориентировки осей аномалий, цепочки линейных положительных и отрицательных аномалий), сейсморазведка (понижение значений граничных скоростей), эманационный метод (по радону).

С разрывными нарушениями связаны зоны трещиноватости, т. е. разрывы сплошности без смещения геологических тел. Трещиноватость обуславливает водопроницаемость скальных и полускальных горных пород, влияет на их прочностные и деформационные свойства. Геофизические аномалии определяются: общим объемом трещин по отношению к объему массива, распределением и ориентацией трещин в массиве, характером заполнителя трещин (воздух, вода, лед и т. д.).

Установлены закономерные связи геоэлектрических показателей с трещиноватостью. Коэффициент трещинной пустотности  $K_{тр}$  взаимосвязан с сопротивлением трещиноватых пород ( $\rho_{тр}$ ), сопротивлением заполнителя трещин ( $\rho_3$ ), сопротивлением массивных пород ( $\rho_m$ ). УЭС трещиноватой породы с уменьшением трещинной пустотности приближается к сопротивлению монолитных пород; увеличение сопротивления заполнителя приводит к сближению УЭС трещиноватых и монолитных пород; с увеличением сопротивления монолитных пород влияние трещиноватости на УЭС трещиноватых пород увеличивается.

Эффективным методом изучения систем трещин являются круговые ВЭЗ методом сопротивлений. Полярные диаграммы КЭС представляют собой эллипсы, большие оси которых ориентированы по простиранию доминирующей системы трещин.

Скважинную электроразведку применяют для выделения трещиноватых зон в вертикальном разрезе. При полном водонасыщении трещин с помощью бокового каротажного зондирования (БКЗ) и резистивиметрии воды можно определить коэффициент трещиноватости по формуле

$$K_{тр} = \frac{1,5\rho_3(\rho_m - \rho_{тр})}{\rho_m \cdot \rho_{тр}}.$$

Эффективным методом изучения трещиноватости является сейсмоакустический метод в наземном, подземном и скважинном вариантах. Для количественной оценке трещиноватости чаще всего используется ультразвуковой каротаж, на основании которого определяют скорости продольных волн в массиве трещиноватых пород, в заполнителе трещин, в минеральном скелете. По этим данным рассчитывают коэффициент трещиноватости.

Водопроницаемость – это способность массивов горных пород пропускать через себя воду при наличии гидравлического градиента. В скальных породах она почти полностью обусловлена открытой трещиноватостью и наличием каверн. В рыхлых породах – крупными взаимосвязанными порами. В полускальных породах – трещинами и порами.

В основе применения геофизических методов в данном случае лежит корреляция между коэффициентом фильтрации и электрическим сопротивлением. Характер этой корреляции зависит от состава пород, минерализации вод и различается в разных регионах. Общая закономерность: чем выше сопротивление, тем выше Кф (положительная корреляция).

Используют вспомогательный параметр – относительное сопротивление

$$P = \frac{\rho_n}{\rho_b},$$

где  $\rho_n$  – сопротивление породы;  
 $\rho_b$  – сопротивление воды в порах.

Связь относительного сопротивления с коэффициентом фильтрации в общем виде описывает формула

$$P = \frac{b_{cp}}{K\phi^m},$$

где  $b_{cp}$  и  $m$  – константы для определенного литологического и гранулометрического состава.

Оценка водопроницаемости возможна по коэффициенту поляризации  $\eta$  (метод вызванной поляризации)

$$\eta = a \cdot K\phi^b,$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от состава пород.

### **3.3 Изучение зоны аэрации, направления и скорости движения подземных вод**

Зона аэрации – геологическая среда от земной поверхности до уровня подземных вод. При изучении зоны аэрации решаются задачи:

1) изучение условий залегания грунтовых вод; 2) литологическое расчленение разреза; 3) изучение фильтрационных, емкостных и других свойств пород; 4) изучение гидрохимических показателей, оценка засоления; 5) изучение геологических процессов и техногенных воздействий.

Типичной задачей является определение мощности зоны аэрации, т. е. глубины залегания подземных вод. Нижняя граница зоны аэрации отражается в различных геофизических параметрах. Наиболее надежными методами являются сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ) и электроразведка (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП). На данной границы происходит: 1) скачкообразное изменение скорости продольных волн и образуется интенсивная преломленная волна; 2) резкое изменение КЭС (как правило, снижение) и  $\eta_{VP}$  (увеличение).

Изучение направления движения и скорости подземных вод проводится методом ЕП. Предпосылка использования метода ЕП: движение воды в пористой среде проводит к образованию электрического поля фильтрации.

Отрицательные аномалии ЕП отмечают участки повышенной инфильтрации, связанной с атмосферными осадками и поверхностным стоком (могут достигать десятков мВ). Положительные аномалии ЕП возникают при разгрузке подземных вод на земную поверхность (движение снизу вверх). Глубинность метода ЕП составляет 15–20 м.

Аналогично поведение ЕП при каротаже скважин: аномалии ЕП показывают участки, где имеет место активная фильтрация.

Для определения скорости движения подземных вод используются разнообразные методы, в том числе с применением различного типа индикаторов-трассеров (красители, электролиты, радиоизотопы).

Наиболее распространенным является метод, основанный на изучении геоэлектрических эффектов, создаваемых движением электролита в потоке подземных вод (метод заряженного тела – МЗТ). Такой метод используется для определения направления и скорости движения подземных вод по одиночным буровым скважинам. От устья скважины под углом 45° друг к другу разбивают 8 лучей. На луче, выбранном в качестве базисного (в направлении, которое противоположно предполагаемому движению потока), размещают неподвижный приемный электрод N. Для необсаженных скважин базисное расстояние NO от их устья до электрода N должно примерно равняться глубине h залегания изучаемого водоносного горизонта. Для обсаженных металлической колонной скважин оптимальное расстояние составляет 2,5h. В скважину закачивают электролит (раствор NaCl), концентрация которого в стволе скважины должна составлять 2–3 г/л. Один питающий электрод (A) помещают в скважину на глубину h, второй питающий электрод (B) относят в «бесконечность» ( $OB > 10h$ ).

Электролит постепенно движется в направлении потока подземных вод, формируя тело высокой электропроводности (в форме вытянутого языка). На земной поверхности по наблюдательным лучам находят положение эквипотенциальной линии, соответствующей начальной форме зоны электролита (заряженного тела). При малой скорости потока эта зона имеет форму круга. В направлении перемещения тела высокой электропроводности будет смещаться эквипотенциальная линия. Последовательно измеряют несколько эквипотенциальных линий (с интервалом 1–2 ч). При высокой скорости потока (более 3 м/сутки), эти линии фиксируют непрерывно. Продолжительность всего цикла наблюдений – от 8–10 ч до 2–3 суток. В течение всего времени в скважину добавляются новые порции электролита.

По направлению среднемаксимального смещения всех эквипотенциальных линий находят наиболее вероятное направления движения потока подземных вод. Определяется скорость движения подземного потока. Для этого вычисляется отношение

$$V = \frac{\Delta R_{\max}}{\Delta t},$$

где  $\Delta R_{\max}$  – максимальное смещение изолинии по направлению потока;

$\Delta t$  – время, за которое это смещение произошло.

Среднее значение  $V$  можно получить, построив график зависимостей  $\Delta R_{\max}$  от времени  $\Delta t$  (рисунок 3).

МЗТ имеет удовлетворительные результаты при глубине залегания изучаемых водоносных горизонтов на более 80–100 м.

В скважинах для получения гидродинамических параметров используется метод резистивиметрического каротажа.

Применяется следующая методика: 1) определяют сопротивление воды по всему вскрытыму скважиной разрезу; 2) засоляют воду в стволе скважины (минерализация должна составлять 2–3 г/л, что соответствует сопротивлению 2–2,5 Ом·м); 3) проводят серию замеров сопротивления электролита через определенные временные интервалы (величина интервала зависит от скорости опреснения – от минут от суток); 4) участки быстрого опреснения электролита соответствуют местам его интенсивного вымыва; 5) по 3–5 резистивиметрическим диаграммам рассчитывают скорость фильтрации по формуле

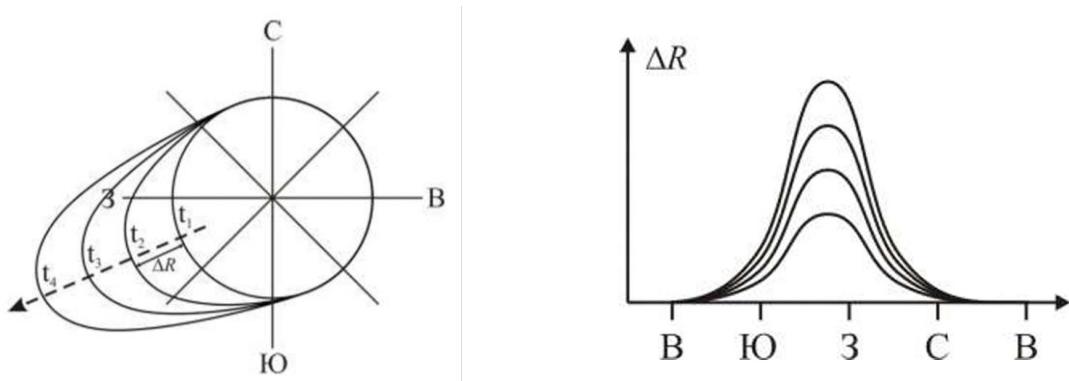
$$V\phi = \left[ \frac{1,81d}{\alpha(t_2 - t_1)} \right] \lg \left[ \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0} \right],$$

где  $d$  – диаметр скважины;

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от проницаемости стенок скважины или фильтра, для чистых стенок  $\alpha = 2$ , для фильтров с гравийной засыпкой  $\alpha = 2-4$ ;

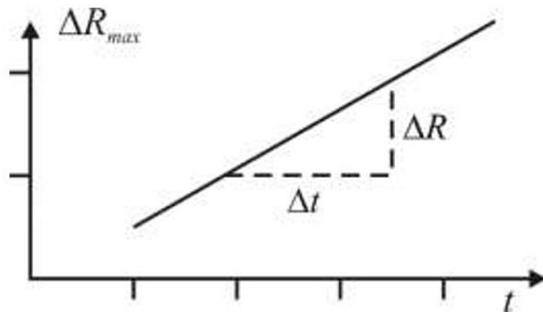
$C_0$  – минерализация воды в скважине до засоления;

$C_1, C_2$  – концентрации электролита в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ .



а

б



в

а – схема изолиний потенциала; б – график смещения изолиний;

в – график для определения скорости

Рисунок 3 – Определение направления и скорости движения подземных вод методом заряда

На основе анализа диаграмм резистивиметрии определяют зоны активной, замедленной и медленной фильтрации. Зона активной фильтрации характеризуется очень быстрым смещением разновременных диаграмм. Опреснение происходит в первые часы. Зона замедленной фильтрации

характеризуется опреснением в течение от 1–2 суток до 2–3 недель. В зоне медленной фильтрации опреснение электролита практически не происходит в течение очень длительного времени.

### 3.4 Изучение месторождений подземных вод

Геофизические методы применяются при поисках и разведке месторождений подземных вод. При изучении месторождений геофизические методы используются для решения следующих задач:

- литологическое расчленение разреза и картирование по площади водоносных и слабопроницаемых пластов;
- изучение степени трещиноватости и закарстованности, определение анизотропии;
- картирование фильтрационных свойств продуктивных и питающих водоносных горизонтов;
- изучение строения и состава русловых и донных отложений в реках, озерах, водохранилищах;
- изучение гидрохимической зональности подземных вод по площади и в разрезе;
- решение специальных задач, связанных с детализацией гидрогеологических условий на участке проектируемого водозабора.

При разведке месторождений пресных вод наземная геофизика применяется на стадии поисков и предварительной разведки, опережая основной объем буровых и опытных работ. На стадии детальной разведки ведущую роль играет каротаж скважин. Ведущим методом является электроразведка, что обусловлено наличием корреляционных зависимостей между водно-физическими и геоэлектрическими параметрами. Для рыхлых осадочных пород прослеживается взаимосвязь между различными геолого-гидрогеологическими свойствами: литологией, глинистостью, коэффициентом общей пористости, коэффициентом фильтрации. В свою очередь перечисленные свойства в комплексе с минерализацией подземных влияют на УЭС горных пород.

При гидрогеологических исследованиях слоистых массивов пород большую роль играют послойные и обобщенные геофильтрационные параметры, которые коррелируют с геоэлектрическими параметрами:

- послойные поперечные гидравлические сопротивления водоупорных пород  $R_{B_i} = \frac{h_i}{K\phi_i}$  коррелируют с  $S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$ , (для песчано-глинистых пород),  $T_i = h_i \cdot \rho_i$  (для валунно-галечниковых и скальных пород);

- обобщенное поперечное гидравлическое сопротивление  $R_B = \frac{\Sigma h}{K\phi}$  (вся толща) коррелирует с  $S = \frac{h}{\rho}$  и  $T = h \cdot \rho$ ;
- послойные коэффициенты водопроводимости  $T_{B_i} = h_i \cdot K\phi_i$  коррелируют с  $T_i = h_i \cdot \rho_i$  (для песчано-глинистых пород) и  $S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$  (для валунно-галечниковых и скальных пород);
- обобщенный коэффициент водопроводимости  $T_B = \Sigma h_i \cdot K\phi_i$  коррелирует с  $T = h \cdot \rho$  (для песчано-глинистых пород) и  $S = \frac{h}{\rho}$  (для валунно-галечниковых и скальных пород);
- послойные коэффициенты фильтрации  $K\phi_i$  коррелируют с послойными  $\rho_i$  (для песчано-глинистых пород) и  $\frac{1}{\rho_i}$  (для валунно-галечниковых и скальных пород);
- обобщенный коэффициент перетекания  $V_p = \sqrt{T_B \cdot R_B}$  коррелирует с величиной  $\sqrt{T \cdot S}$ .

Продольные проводимости  $S$  и поперечные сопротивления  $T$  определяются на основе ВЭЗ.

Общие принципы применения геофизических методов при поисково-разведочных работах на воду:

- 1) анализ геолого-гидрогеологических условий месторождения (района исследований);
- 2) формулирование задач, которые должны решаться геофизическими методами;
- 3) выбор оптимального комплекса геофизических методов с учетом геолого-гидрологических условий объекта, физико-географических условий местности, степени хозяйственного освоения территории;
- 4) обоснование детальности сети геофизических наблюдений для каждого метода, определяемой характером решаемых задач и стадией гидрогеологических исследований;
- 5) обоснование требований к содержанию и объемам геолого-гидрогеологической информации, необходимой для достоверной интерпретации геофизических исследований;
- 6) последовательность выполнения различных видов геофизических работ;

7) корректировка методов, объемов и детальности различных видов геофизических исследований непосредственно в процессе полевых работ с учетом накапливаемой информации;

8) выбор объектов детального геофизического изучения;

9) составление схемы комплексной интерпретации результатов всех видов поисково-разведочных работ;

10) интерпретация результатов геофизических работ и сопоставление их с результатами других методов;

11) анализ геологической и экономической эффективности выполнения геофизических работ.

Последовательность выполнения всех видов геологоразведочных работ на воду меняется в зависимости от стадии работ, на которой применяются геофизические методы, и от типа месторождений подземных вод.

## **Вопросы для самоконтроля**

1 Какие задачи решают геофизические методы в гидрогеологических исследованиях?

2 Как и какими геофизическими методами изучают разрывные нарушения и трещиноватость, оценивают водопроницаемость массивов горных пород?

3 Как и какими геофизическими методами изучают зону аэрации?

4 Как и какими геофизическими методами определяют направление и скорость движения подземных вод?

5 Как и какие из геофизических методов наиболее часто используют при изучении месторождений подземных вод?

## 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

### 4.1 Изучение движения грунтовых вод методом естественного электрического поля

Цель работы – выяснить участки инфильтрации и разгрузки грунтовых вод на основе материалов съемки методом естественного электрического поля.

Материалы: данные съемки методом естественного электрического поля (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты съемки методом естественного электрического поля (способ потенциала, шаг между пикетами 10 м, шаг между профилями 20 м)

Профиль 1		Профиль 2		Профиль 3		Профиль 4	
№ пикета	U, мВ						
1	+0,5	1	-23,0	1	-49,6	1	-2,2
2	+1,0	2	-33,0	2	-33,9	2	-4,3
3	+2,5	3	-45,0	3	-23,1	3	-1,7
4	-1,0	4	-14,0	4	-31,2	4	-0,6
5	-10,0	5	-11,1	5	-9,5	5	+0,9
6	-15,0	6	-9,4	6	-4,5	6	+0,5
7	-22,0	7	-3,3	7	-1,2	7	+1,1
8	-32,0	8	-1,2	8	+0,5	8	+3,1
9	-15,0	9	+4,5	9	+6,5	9	+2,5
10	-3,0	10	+3,1	10	+1,7	10	+1,8
11	-2,0	11	+4,1	11	+4,5	11	+1,2
12	+3,0	12	+0,5	12	+4,2	12	+3,1
13	+1,7	13	+4,1	13	+5,1	13	+1,5
14	+1,9	14	+0,5	14	+1,2	14	+4,5
15	-0,5	15	+3,2	15	+3,6	15	+12,9
16	+3,5	16	+1,2	16	+10,6	16	+25,0
17	+4,5	17	+1,5	17	+15,5	17	+35,0
18	+2,4	18	+1,2	18	+17,5	18	+29,0
19	+1,7	19	0	19	+21,6	19	+28,6
20	+3,5	20	+3,5	20	+22,5	20	+33,8

Ход работы:

- 1) построить графики изменения потенциала естественного электрического поля по профилям;
- 2) по графикам изменения потенциала естественного электрического поля выделить участки инфильтрации грунтовых вод на каждом профиле;

- 3) по графикам изменения потенциала естественного электрического поля выделить участки разгрузки грунтовых вод на каждом профиле;
- 4) с помощью геоинформационной системы Surfer построить карту изолиний потенциала естественного электрического поля;
- 5) проанализировать карту изолиний потенциала естественного электрического поля, указать зоны инфильтрации и разгрузки грунтовых вод;
- 6) на основе анализа карты изолиний, зон инфильтрации и разгрузки выяснить и показать направление движения грунтовых вод;
- 7) выводы.

## **4.2 Определение места коррозии трубопровода методами электроразведки**

Цель работы – диагностировать участки коррозии трубопровода на основе электрического профилирования и метода естественного электрического поля.

Материалы: данные электрического профилирования и метода естественного электрического поля (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Результаты электрического профилирования (установка Шлюмберже, АВ = 15, MN = 3) и метода естественного электрического поля (способ потенциала, MN = 10 м)

№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м	U, мВ	№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м	U, мВ
1	2	3	4	5	6
1	88	0	16	200	+3
2	67	+1	17	193	0
3	160	+54	18	174	+5
4	101	+11	19	102	+46
5	22	+88	20	66	+77
6	25	+45	21	25	+102
7	19	+25	22	18	+18
8	88	+5	23	33	+88
9	140	-1	24	12	+57
10	170	-5	25	25	+110
11	177	-29	26	33	+33
12	190	-22	27	120	+5
13	191	-17	28	99	-4

Окончание таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6
14	179	-15	29	139	-11
15	190	-10	30	125	-15

**Задание**

- 1) построить графики изменения кажущегося сопротивления и потенциала естественного электрического поля по профилю;
- 2) по графику кажущегося сопротивления выделить низкоомные участки;
- 3) по графику потенциала ЕП выделить положительные и отрицательные аномалии, дать их интерпретацию;
- 4) проанализировать спаренные изменения кажущегося сопротивления и потенциала ЕП, указать участки наибольшей коррозионной активности;
- 5) выводы.

### **4.3 Определение участка разгрузки подмерзлотных вод, приуроченного к зоне тектонического нарушения**

Цель работы – определить участок разгрузки подмерзлотных вод, приуроченный к зоне тектонического нарушения.

Материалы: результаты площадной геомагнитной съемки (таблица 4.3), электрического профилирования (таблица 4.4) и комплекса исследований по руслу реки (таблица 4.5).

**Задание:**

- 1) по таблице 4.3 построить карту кажущегося сопротивления в изомах;
- 2) по таблице 4.4 построить карту изодинам геомагнитного поля;
- 3) по таблице 4.5 построить графики изменения по профилю потенциала естественного поля, температуры и кажущегося сопротивления;
- 4) оценить корреляцию между потенциалом естественного поля, температурой и кажущимся сопротивлением;
- 5) определить местоположение тектонического нарушения;
- 6) определить места разгрузки подмерзлотных вод и их примерные площади;
- 7) определить участок для разведочного гидрогеологического бурения;
- 8) выводы.

Таблица 4.3 – Результаты геомагнитной съемки (расстояние между профилями и точками наблюдения 10 м,  $\Delta Z$  в нТл)

Профиль	Пикеты										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	-50	-120	-140	-210	-240	-320	-270	-180	-150	-70	-40
II	-140	-130	-180	-220	-280	-290	-240	-70	-220	-60	30
III	-200	-120	-170	-190	-260	-300	-220	-70	-210	0	0
IV	-100	-110	-200	-220	-210	-200	-210	-90	-220	100	150
V	-90	-80	-100	-120	-190	-130	-190	-80	0	120	320
VI	-80	-70	-100	-90	-140	-140	-110	90	-220	100	120
VII	-60	-20	-90	-50	-90	-70	140	400	-400	200	410
VIII	-40	-100	-60	-10	0	-80	-70	100	-200	100	530
IX	-70	-100	-30	0	20	0	-60	0	-180	200	600
X	-60	-50	0	60	70	20	-20	-150	-300	400	800
XI	-90	-90	40	90	90	90	-40	-180	-200	600	700
XII	-100	0	50	110	120	110	-90	-100	-70	0	600
XIII	0	10	110	200	210	120	-120	-60	-40	-500	400
XIV	80	90	100	210	300	190	-140	-70	-70	-400	200
XV	130	160	150	230	320	220	-50	-20	-100	-100	100

Таблица 4.4 – Результаты электропрофилирования ( $AB = 40$ ,  $MN = 10$  м, расстояние между профилями и точками наблюдения 10 м, КЭС в Ом · м)

Профиль	Пикеты										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	920	970	1 000	1 400	1 100	850	1 900	930	1 200	1 100	2 600
II	780	740	1 200	2 100	900	930	1 200	850	1 350	2 900	2 700
III	1 300	200	2 100	980	880	850	830	1 000	1 450	3 200	3 100
IV	2 100	1 900	1 800	960	950	940	1 200	740	1 100	3 100	2 400
V	2 200	1 800	940	920	950	960	1 300	1 200	1 400	4 200	3 800
VI	2 100	1 700	1 800	900	930	950	2 000	1 300	1 250	7 500	4 800
VII	920	930	940	950	970	1 200	2 800	1 800	1 750	4 000	5 200
VIII	970	960	980	960	1 200	1 400	3 000	1 900	1 300	4 300	4 800
IX	940	950	970	980	4 000	4 700	5 000	2 000	2 500	6 100	5 800
X	950	900	1 200	1 100	4 900	6 000	2 100	2 500	2 900	6 200	6 100
XI	920	930	960	980	2 400	5 200	6 300	2 100	2 600	5 900	5 100
XII	1 000	1 200	1 300	1 400	4 700	6 100	6 500	1 750	2 100	6 500	6 100
XIII	1 200	1 300	1 400	2 700	4 600	6 500	4 500	1 800	2 000	5 800	5 300
XIV	2 300	2 600	2 700	3 200	3 700	5 900	3 800	1 900	1 850	6 100	6 400
XV	1 400	1 700	2 100	2 200	2 300	3 400	3 000	2 000	2 100	6 300	6 200

Таблица 4.5 – Результаты исследований по профилю вдоль реки (примерно между 7–8 пикетом)

№ пикета	U, мВ	T, °C	КЭС, Ом · м	№ пикета	U, мВ	T, °C	КЭС, Ом · м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	11,2	4,7	220	16	40	4,7	200
2	10,1	4,6	217	17	54	4,8	205

Окончание таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8
3	10,5	4,2	192	18	55	3,8	201
4	12,4	4	170	19	45	3,1	202
5	14,2	4	165	20	39	2,9	216
6	13,6	3,8	155	21	25	2,3	217
7	12,5	2,6	144	22	19	2,2	220
8	16,1	2,4	142	23	14	2,1	180
9	17,2	2,1	168	24	12,5	2	165
10	18,1	3,2	175	25	18	2,3	155
11	18,2	3,1	182	26	11	4,5	140
12	19,8	4,6	190	27	11,5	4,7	159
13	26	4	210	28	12,8	5,3	190
14	28	3,9	210	29	10	6,5	220
15	30	4,1	217	30	12	7,5	240

#### **4.4 Определение направления и скорости движения подземных вод методом заряженного тела**

Цель работы – определить направление и скорости движения подземных вод с помощью метода заряженного тела.

Материалы: результаты измерений потенциала в скважине (таблица 4.6).

Задание:

- 1) по таблице 4.6 построить диаграмму изолиний потенциала;
- 2) построить график смещения изолиний потенциала вдоль направления движения подземных вод;
- 3) по величине максимального смещения изолиний определить направление и скорость потока подземных вод

$$V = \frac{\Delta R}{\Delta t};$$

4) выводы.

Таблица 4.6 – Результаты наблюдений методом заряженного тела

№ луча	Направле- ние луча, градус	Дата и время регистрации Расстояние от центра скважины, м			
		До засоления	После засоления	До засоления	После засоления
1	110	20 мая, 8 ч 31,0	20 мая, 20 ч 5 мин 31,5	21 мая, 8 ч 32,0	22 мая, 9 ч 32,0
2	155	20 мая, 8 ч 5 мин 31,5	20 мая, 20 ч 10 мин 31,5	21 мая, 8 ч 5 мин 32,0	22 мая, 9 ч 32,0
3	200	20 мая, 8 ч 10 мин 30,5	20 мая, 20 ч 15 мин 32,0	21 мая, 8 ч 10 мин 33,0	22 мая, 9 ч 5 мин 34,0
4	245	20 мая, 8 ч 15 мин 31,0	20 мая, 20 ч 20 мин 34,0	21 мая, 8 ч 15 мин 38,0	22 мая, 9 ч 10 мин 43,0
5	290	20 мая, 8 ч 20 мин 30,5	20 мая, 20 ч 30 мин 35,0	21 мая, 8 ч 20 мин 40,0	22 мая, 9 ч 15 мин 45,0
6	335	20 мая, 8 ч 30 мин 31,0	20 мая, 20 ч 40 мин 34,0	21 мая, 8 ч 25 мин 39,0	22 мая, 9 ч 20 мин 44,0
7	20	20 мая, 8 ч 40 мин 31,0	20 мая, 20 ч 45 мин 32,0	21 мая, 8 ч 30 мин 33,0	22 мая, 9 ч 30 мин 35,0
8	65	20 мая, 8 ч 45 мин 31,0	20 мая, 20 ч 45 мин 32,0	21 мая, 8 ч 30 мин 32,0	22 мая, 9 ч 40 мин 34,0

## 4.5 Выявление зон развития суффозии методом инженерной гравиразведки

Цель работы – определить потенциально опасный участок, на котором развивается суффозия.

Материалы: результаты гравиметрической съемки (таблица 4.7).

Задание

На исследуемой территории развивается процесс суффозии. Литология верхней части разреза (до 50 м): пески, супеси, суглинки, глины. С глубины 50 м – известняки.

1) используя исходные данные (таблица 4.7), рассчитать  $\Delta g$  по формуле:  $\Delta g = g_{\text{набл}} + 0,3086 \cdot H - 0,0419 \cdot \sigma \cdot H - g_0$ , где  $g_{\text{набл}}$  – измеренное значение силы тяжести;  $H$  – высота пункта наблюдения,  $\sigma$  – плотность пород промежуточного слоя ( $\text{г}/\text{см}^3$ ),  $g_0$  – значение силы тяжести на локальном опорном пункте;

2) построить графики изменения  $\Delta g$  по профилям;

3) используя программу ZondGM2D, определить параметры зоны разуплотнения (глубина, ширина, дефицит плотности  $\Delta\sigma_m$ );

4) построить карту в изолиниях  $\Delta g$  и выделить на ней суффозионно опасные зоны;

5) дать инженерно-геологическое объяснение аномалиям  $\Delta g$  на каждом профиле по отдельности и по участку в целом;

6) выводы.

Таблица 4.7 – Результаты гравиметрической съемки (расстояние между пикетами 10 м, расстоянием между профилями 50 м)

№ пикета	Профиль 1		Профиль 2		Профиль 3	
	$g_{\text{набл}}$	$H, \text{ м}$	$g_{\text{набл}}$	$H, \text{ м}$	$g_{\text{набл}}$	$H, \text{ м}$
1	115,00	140,0	115,90	140,0	116,00	140,0
2	115,30	141,0	115,60	140,0	116,05	140,0
3	115,25	141,0	115,90	140,0	115,90	139,0
4	115,35	140,0	116,00	139,0	115,50	139,0
5	115,45	139,0	116,20	139,0	115,60	139,0
6	115,50	139,0	116,40	138,0	115,50	139,0
7	115,25	138,0	116,50	138,0	115,30	139,0
8	115,30	138,0	116,50	138,0	115,10	138,0
9	115,30	138,0	116,00	137,0	115,00	138,0
10	115,27	138,0	115,20	137,0	114,50	138,0
11	115,00	138,0	115,40	137,0	114,40	137,0
12	114,95	137,0	115,10	136,0	114,00	137,0
13	114,50	137,0	115,00	136,0	114,00	137,0
14	114,30	137,0	114,50	136,0	114,50	137,0
15	114,10	137,0	114,10	136,0	114,60	137,0
16	114,10	136,0	113,00	136,0	114,70	136,0
17	114,25	136,0	113,50	135,0	114,80	136,0
18	114,45	135,0	114,00	135,0	114,90	136,0
19	114,80	135,0	114,70	135,0	115,00	136,0
20	114,90	135,0	114,60	134,0	115,00	136,0

## **4.6 Картирование оползня методом инженерной гравиразведки**

Цель работы – картировать зону оползня по аномалиям гравитационного поля.

Материалы: результаты гравиметрической съемки (таблица 4.8).

Задание

На исследуемой территории развивается процесс оползнеобразования. Литология верхней части разреза (до 20 м): пески, супеси, суглинки, глины. С глубины 20 м – известняки.

1) используя исходные данные (таблица 4.8), рассчитать  $\Delta g$  по формуле:  $\Delta g = g_{\text{набл}} + 0,3086 \cdot H - 0,0419 \cdot \sigma \cdot H - g_0$ , где  $g_{\text{набл}}$  – измеренное значение силы тяжести;  $H$  – высота пункта наблюдения,  $\sigma$  – плотность пород промежуточного слоя ( $\text{г}/\text{см}^3$ ),  $g_0$  – значение силы тяжести на локальном опорном пункте;

2) построить графики изменения  $\Delta g$  по профилям;

3) используя программу ZondGM2D, определить параметры зоны разуплотнения (глубина, ширина, дефицит плотности  $\Delta\sigma_m$ );

4) построить карту в изолиниях  $\Delta g$  и выделить на ней опозненопасные зоны;

5) дать инженерно-геологическое объяснение аномалиям  $\Delta g$  на каждом профиле по отдельности и по участку в целом;

6) выводы.

Таблица 4.8 – Результаты гравиметрической съемки (расстояние между пикетами 5 м, расстоянием между профилями 20 м)

№ пикета	Профиль 1		Профиль 2		Профиль 3		Профиль 4	
	$g_{\text{набл}}$	$H, \text{м}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	112,00	131,0	112,10	129,0	113,00	129,0	113,00	128,0
2	112,10	130,0	112,30	129,0	113,05	129,0	113,00	128,0
3	112,20	130,0	112,90	129,0	113,90	129,0	113,00	128,0
4	112,30	130,0	113,00	129,0	113,50	129,0	112,90	128,0
5	112,40	130,0	113,20	130,0	113,60	130,0	112,80	127,0
6	112,50	130,0	113,40	130,0	113,50	130,0	112,90	127,0
7	112,40	129,0	113,50	130,0	113,30	130,0	112,50	127,0
8	112,30	129,0	113,50	129,0	113,10	129,0	112,10	127,0
9	112,10	129,0	113,00	128,0	113,00	128,0	112,05	126,0
10	112,00	129,0	112,20	128,0	112,50	127,0	112,00	125,0
11	112,50	128,0	112,40	128,0	112,40	126,0	111,90	125,0
12	112,20	128,0	111,10	127,0	112,00	125,0	111,00	125,0

Окончание таблицы 4.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	112,00	129,0	111,00	127,0	112,00	125,0	110,50	126,0
14	112,00	130,0	111,50	127,0	111,50	124,0	110,00	126,0
15	112,40	130,0	111,10	127,0	111,60	124,0	110,90	126,0
16	112,45	130,0	112,00	128,0	111,70	124,0	111,05	126,0
17	112,44	131,0	112,50	128,0	111,80	125,0	112,00	126,0
18	112,57	131,0	113,00	128,0	111,90	126,0	112,10	126,0
19	112,88	131,0	113,70	129,0	111,00	127,0	112,20	126,0
20	112,10	131,0	113,60	129,0	111,00	128,0	112,26	126,0

## 4.7 Изучение трещинноватости массива грунтов методом сопротивлений

Цель работы – выяснение направления трещинноватости в массиве грунтов методом сопротивлений.

Материалы: проведены круговые измерения кажущегося электрического сопротивления (КЭС) с разносами  $A_1B_1 = 20$ ,  $M1N1 = 2$  м,  $AB = 30$  м,  $MN = 3$  м,  $AB = 50$  м,  $MN = 5$  м,  $AB = 100$  м,  $MN = 20$  м,  $AB = 150$  м,  $MN = 50$  м при азимутах через  $30^\circ$  (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Круговые измерения кажущегося электрического сопротивления

Азимут установки	КЭС, Ом · м, AB = 20 м	КЭС, Ом · м, AB = 30 м	КЭС, Ом · м, AB = 50 м	КЭС, Ом · м, AB = 100 м	КЭС, Ом · м, AB = 150 м
0	280	320	360	120	55
30	200	240	300	150	25
60	180	230	250	160	67
90	220	260	330	200	100
120	280	350	400	250	90
150	510	610	700	300	110
180	290	340	350	140	100

Задание:

- 1) изучить изменения кажущегося сопротивления (КЭС) с глубиной;
- 2) построить круговые диаграммы (КЭС) для каждого интервала глубин;
- 3) определить направление трещинноватости массива грунтов для каждого интервала глубин;
- 4) определить изменения направления трещинноватости с глубиной;
- 5) выводы.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Аплонов, С. В. Геофизика для геологов : учебник. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2010. – 248 с.
- 2 Бурлуцкий, С. Б. Оценка инженерно-геологических условий оползневых склонов / С. Б. Бурлуцкий, Е. С. Кудашев. – СПб. : Лема, 2018. – 35 с.
- 3 Гусев, А. П. Техническая и экологическая геофизика. Часть 1. Техническая геофизика / А. П. Гусев. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2024. – 86 с.
- 4 Гусев, А. П. Техническая и экологическая геофизика. Часть 2. Экологическая геофизика / А. П. Гусев. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – 81 с.
- 5 Капустин, В. В. Техническая геофизика. Методы и задачи / В. В. Капустин, М. Л. Владов // Геотехника. – 2020. – Том XII. – № 4. – С. 72–85.
- 6 Крапивский, Е. М. Геофизические методы диагностики технического состояния подземных трубопроводов : учебное пособие. Часть 1. Методы постоянного и низкочастотного переменного тока / Е. М. Крапивский, Н. П. Демченко. – Ухта, 2001. – 159 с.
- 7 Манштейн, А. К. Малоглубинная геофизика. Пособие по спецкурсу / А. К. Манштейн. – Новосибирск : НГУ, 2002. – 135 с.
- 8 Методические рекомендации по применению комплекса геофизических методов при гидрогеологических и геоэкологических исследованиях на акваториях. – М. : ГИДЭК, 2002. – 55 с.
- 9 Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии / под ред. Н. И. Горяинова. – М. : Недра, 1985. – 184 с.
- 10 Методы технической геофизики : учебное пособие / А. А. Чуркин, В. В. Капустин, И. Н. Модин, В. А. Шевнин. – Тверь : ООО «ПолипРЕСС», 2025. – 272 с.
- 11 Никитин, А. А. Комплексирование геофизических методов : учебник для вузов / А. А. Никитин, В. К. Хмелевской. – М. : ВНИИгeosистем, 2012. – 346 с.
- 12 Огильви, А. А. Основы инженерной геофизики / А. А. Огильви. – М. : Недра, 1990. – 501 с.
- 13 Огильви, А. А. Сборник задач по геофизическим методам разведки / А. А. Огильви, Э. Н. Кузьмина, З. Г. Ященко. – М. : Недра, 1985. – 200 с.
- 14 Свод правил по проектированию и строительству «Инженерно-геологические изыскания для строительства» (СП 11-105-97). Часть VI.

Правила производства геофизических исследований. – М. : Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004. – 50 с.

15 Хмелевской, В. К. Геофизические методы исследования земной коры : в 2 кн. Кн. 2. Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика / В. К. Хмелевской. – Дубна : Международный университет природы, общества и человека, 1999. – 184 с.

16 Шувалов, В. М. Комплексное применение методов геофизики на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений и коммуникаций / В. М. Шувалов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2011. – Вып. 4 (13). – С. 46–60.

17 Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей : в 2 т. Т. 2. Малоглубинная электроразведка / под ред. : В. А. Шевнина, А. А. Бобачева. – М. : МГУ, 2013. – 123 с.

18 Электроразведка. Справочник геофизика: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. : В. К. Хмелевского, В. М. Бондаренко. – М. : Недра, 1989. – 378 с.

Производственно-практическое издание

Гусев Андрей Петрович

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

Практическое пособие

Редактор Е. С. Балашова  
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 16.02.2026. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,05.

Тираж 10 экз. Заказ 63.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий в качестве:

издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;

распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.