

УДК 550.834.05

Оценка объёмной плотности грунтов Московской агломерации при карстологическом прогнозе

■ Романов В.В., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.

■ Новиков П.В., Матюшенко А.А., Посеренин А.И. РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация. В работе выполняются анализ и обобщение распределений значений плотности и скоростей упругих волн Московской агломерации и нахождение эмпирического соотношения между ними.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, определение плотности по данным сейсморазведки, Московская агломерация

Введение

Московская агломерация в настоящее время занимает первое место в России и Европе, как крупнейшая городская территория. Её радиус (с учётом маятниковой миграции) достигает 80 км, её население достигает 22 миллионов человек. Регион отличается высокой плотностью застройки, активно застраиваются новые территории и ранее освоенные территории. В связи с этим, повышенный интерес вызывает геологическое строение и физические свойства верхней части разреза, породы (грунты) которой активно взаимодействуют с продуктом хозяйственной деятельности человека — зданиями и сооружениями. Негативное влияние на инфраструктуру агломерации оказываются опасные геодинамические явления — карст, суффозия, оползни и т.д.

В карбонатных скальных грунтах Московской агломерации распространены проявления древнего карста (растворения пород подземными водами с последующими выносом продуктов растворения), что является существенной проблемой для градостроительной деятельности.

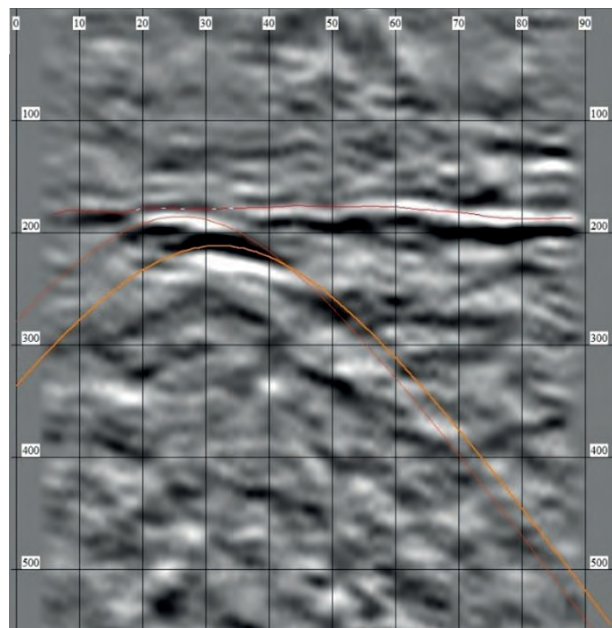
В Московской агломерации наблюдается — русский (по Г.А. Максимовичу), восточно-европейский (по М.А. Зубашенко), среднерусский (по И.В. Попову), закрытый (покрытый) тип карстового процесса. Не менее распространена суффозия — механический вынос части нерастворимых пород потоком подземных вод,

зачастую обусловленная карстовым процессом [Кочев, Чертков, 2018].

Вопросы проектирования фундаментов зданий и сооружений в зонах карстово-суффозионной опасности приобретают особую важность в связи со значительным увеличением количества опасных явлений, связанных с оседаниями и провалами дневной поверхности земли [Романов и др., 2026]. Критический анализ геологических условий площадки строительства и предупреждение подобных проявлений является важнейшей задачей геомеханики.

Инженерные геофизические методы позволяют за короткий срок исследовать площадку изысканий по регулярной плотной сети без прямого контакта с объектом исследования, их глубина и разрешающая способность достаточна для выделения границ в верхней части разреза [Давыдов, 2023]. Геофизические методы выполняются в наземном, скважинном и межскважинном вариантах [Романов, 2023], они применяются для решения следующих задач, связанных с карстовыми процессами:

- Определение рельефа кровли слоя карстующихся пород (поиск проявлений карстового процесса - переуглублений в скальном основании)
- Оценка физических свойств грунтов в естественном залегании (объёмной плотности и т.д.)
- Определение мощности покрыва-



▲ Рис. 1. Выделение кровли каменноугольных известняков в верхней части разреза на разрезе МОВ-ОГТ. Также выделены оси синфазности дифрагированных волн, образованных в верхней кромке карстовых полостей.

ющей толщи и её отдельных слоёв, в частности — водоупорных юрских глин;

- Поиск локальных неоднородностей — полостей, зон трещиноватости, погребённых останцов.
- Оценка состояния кровли карбонатного цоколя

В качестве основных методов для изучения карстовых процессов в СП 446.1325800.2019 устанавливаются методы электроразведки (вертикальное электрическое зондирование, электро-томография, дипольное электрическое зондирование, частотное зондирование, зондирование становлением поля, георадиолокационное зондирование) и сейсморазведки (метод преломлённых волн, метод отражённых волн (Рис. 1), метод поверхностных волн (MASW), вертикальное сейсмическое профилирование, межскважинное сейсмическое просвечивание [Романов, 2022]).

В пределах Московской агломерации

применение электрических методов затруднительно из-за затруднений с заземлением электродов, высокого уровня электромагнитных помех, большого количества низкоомных техногенных образований, малой глубинности и низкой разрешающей способности.

Применение же наземных и скважинных сейсмических методов позволяет успешно и оперативно решать все задачи, связанные с изучением и прогнозированием развития карстовых процессов. Одним из ключевым преимуществ сейсмических методов является определение упругих, плотностных и прочностных свойств грунтов ВЧР в естественном залегании, однако эта возможность базируется на применении эмпирических соотношений.

Для оценки напряжённо-деформированного состояния слоёв грунтовой толщи, с которой взаимодействует сооружение должны быть известны такие свойства, как объёмная плотность, удельное сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент пористости, модуль полной деформации и коэффициент Пуассона [Шебуняев, Юдина, 2018].

В частности, для нахождения упругих модулей по сейсмическим свойствам необходимо значение объёмной плотности, которая сейсморазведкой напрямую не определяется.

Поэтому, для успешного раскрытия всех возможностей сейсморазведки при изучении карстовой опасности и карстологическом прогнозе в Московской агломерации необходимо наличие статистически обоснованной региональной эмпирической зависимости между сейсмическими свойствами (скоростями упругих волн) и плотностью.

Методика и результаты

Верхняя часть разреза территории
Московская агломерация включает 4 сей-
смо-стратиграфических комплекса (ССК):

- 1) Четвертичный
- 2) Меловой

3) Юрский

4) Каменноугольный

Каждый комплекс включает элементы
(подразделения), выделяемые по возра-
сту, литологическому составу и генези-
су [Романов, 2015] (Таблица 1). Сводная

▼ Табл. 1. Средние плотности грунтов Московского региона.

№	Обозначение	Состав или возраст	Плотность, г/см ³
1	tQ _{IV}	техногенные грунты	1,61
2	a-dQ _{IV}	аллювиальные, пролювиальные, озёрные и болотные грунты, дефлационные	1,95
3	prQ _{III}	покровные грунты	1,98
4	aQ _{III}	аллювиальные грунты	1,89
5	afQ _{III}	аллювиально-флювиогляциальные грунты	2,06
6	fQ _{III}	флювиогляциальные грунты	1,97
7	lbQ _{III}	озёрно-болотные грунты	1,71
8	gQ _{II}	гляциальные грунты	2,16
9	lgQ _{II}	лимно-гляциальные грунты	1,96
10	fQ _{II}	флювиогляциальные грунты	2,02
11	gQ _I	гляциальные грунты	2,18
12	lg-fQ _I	лимно-гляциальные и флювиогляциальные грунты	2,03
13	K ₂ cn-km	сантон-компанский ярусы	1,82
14	K ₂ t-k	турон-коньяский ярусы	2,02
15	K ₂ s	сеноманский ярус	1,80
16	K ₁ al	альбский ярус	1,90
17	K ₁ a	аптский ярус	1,98
18	K ₁ h-br	готерив-барремский ярусы	1,94
19	J ₃ v	волжский ярус	1,98
20	J ₃ ox-km	оксфорд-киммериджский ярусы	1,76
21	J ₂ cl	келловейский ярус	2,00
22	C ₃ sc	щёлковская свита	2,09
23	C ₃ rs	русавкинская свита	2,32
24	C ₃ tr	трошковская свита	1,99
25	C ₃ ms	мясницкая (измайловская) свита	2,19
26	C ₃ sd	садовая (мещеринская) свита	2,10
27	C ₃ prs	пресненская (перхуровская) свита	2,22
28	C ₃ msc	мещеринская (неверовская) свита	2,20
29	C ₃ prh	перхуровская(ратмировская) свита	2,27
30	C ₃ nv	неверовская (воскресенская) свита	2,08
31	C ₃ vs	воскресенская (верхняя пачка суворовской свиты) свита	2,35
32	C ₃ sv	суворовская (нижняя пачка суворовской свиты) свита	2,24
33	C ₂ pd-mc	подольская и мячковская свита	2,30

таблица типовых (нормативных) значений сейсмических, упругих, плотностных и прочностных свойств слоёв грунтов Московской агломерации в настоящее время отсутствует, данные о сейсмических свойствах разрознены и относятся они большей частью к каменноугольным и юрским отложениям. Значения плотности, приведённые в статье, были собраны и обобщены на основании данных, содержащихся в отчётах по инженерно-геологическим изысканиям и в научных публикациях (Таблица 1). В таблице приведены средние арифметические значения, в случае существенных расхождений между модальными и средними значениями, приводятся средние между ними.

Сейсмические свойства (скорости продольных и поперечных волн) в литературных источниках приведены для песков и суглинков четвертичной системы, юрских глин (преимущественно оксфордских), каменноугольных глин, мергелей и известняков касимовского и московского ярусов. Данные о сейсмических свойствах были получены вертикальным сейсмическим профилированием, ультразвуковой керноскопией, межскважинным просвечиванием.

Основные публикации на эту тему представлены специалистами ИГЭ РАН и кафедры сейсмометрии и геоакустики МГУ. Во всех случаях сейсмические свойства определялись скважинными и лабораторными методами, данных, полученных наземными методами практически нет, по некоторым стратиграфическим подразделениям сейсмические свойства не определялись или они приведены по небольшому числу неуказанных объектов [Романов и др., 2018].

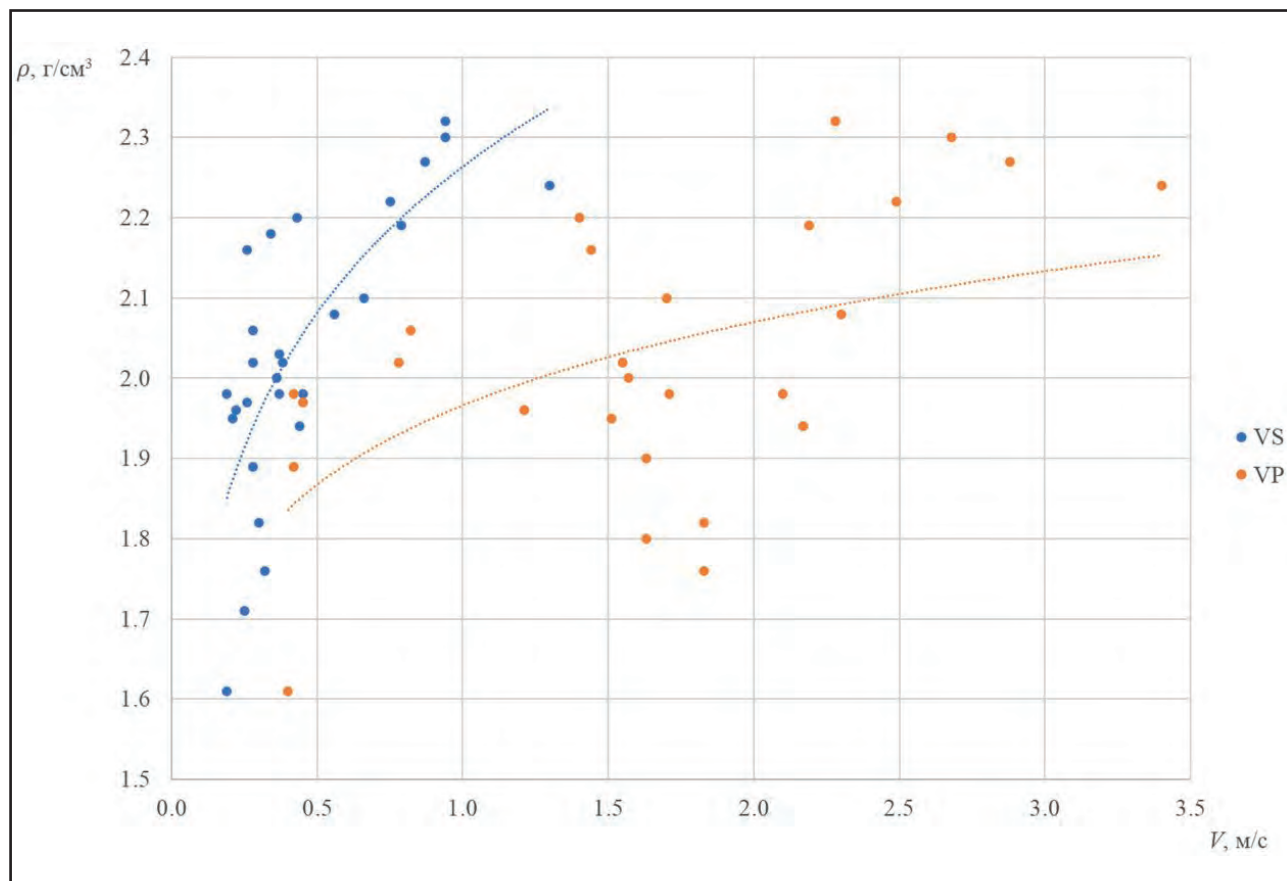
Данные, приведённые в таблице 2, получены преимущественно наземными методами (сейсмической томографией, МПВ, МОВ-ОГТ и MASW) [Романов, Шнеерсон, 2018] и привязаны к стратиграфическим

№	Обозначение	V_s , м/с	V_p , м/с
1	tQ_{IV}	190	400
2	$a-dQ_{IV}$	210	1510
3	prQ_{III}	190	420
4	aQ_{III}	280	420
5	afQ_{III}	280	820
6	fQ_{III}	260	450
7	lbQ_{III}	250	
8	gQ_{II}	260	1440
9	lgQ_{II}	220	1210
10	fQ_{II}	280	780
11	gQ_I	340	
12	$lg-fQ_I$	370	
13	$K_2 \text{ cn-km}$	300	1830
14	$K_2 \text{ t-k}$	380	1550
15	$K_2 \text{ s}$		1630
16	$K_1 \text{ al}$		1630
17	$K_1 \text{ a}$	450	2100
18	$K_1 \text{ h-br}$	440	2170
19	$J_3 \text{ v}$	370	1710
20	$J_3 \text{ ox-km}$	320	1830
21	$J_2 \text{ cl}$	360	1570
22	$C_3 \text{ sc}$		
23	$C_3 \text{ rs}$	940	2280
24	$C_3 \text{ tr}$		
25	$C_3 \text{ ms}$	790	2190
26	$C_3 \text{ sd}$	660	1700
27	$C_3 \text{ prs}$	750	2490
28	$C_3 \text{ msc}$	430	1400
29	$C_3 \text{ prh}$	870	2880
30	$C_3 \text{ nv}$	560	2300
31	$C_3 \text{ vs}$		
32	$C_3 \text{ sv}$	1300	3400
33	$C_2 \text{ pd-mc}$	940	2680

▲ Табл. 2. Средние значения сейсмических свойств Московского региона.

подразделениям, указанным в таблице 1.

На основании таблиц 1, 2 получены обобщающие показательные уравнения, позволяющие находить плотность по скоростям сейсмических волн (1) – (2). На рис.2 показаны кросс-плоты, иллю-



▲ Рис. 2. Кросс-плоты скоростей сейсмических волн и плотности.

стрирующие тесноту связи плотности и скоростей.

$$\rho = 1,97 \cdot V_p^{0,07} \quad (1)$$

$$\rho = 2,26 \cdot V_s^{0,12} \quad (2)$$

Для дочетвертичных отложений коэффициенты уравнения изменяются, особенно для продольных волн (3)–(4).

$$\rho = 1,78 \cdot V_p^{0,20} \quad (3)$$

$$\rho = 2,28 \cdot V_s^{0,16} \quad (4)$$

Выводы

Из приведённых выражений наибольшей теснотой корреляции (0,78) обладает формула (4), что позволяет рекомендовать её для оценки плотности грунтов Московской агломерации по скорости поперечных сейсмических волн.

Литература

1. Давыдов В.А. Выявление карста геофизическими методами с применением микросейсмических зондирований // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. № 1 (69). С. 108-113.
2. Кочев А.Д., Чертков Л.Г. Использование методов сейсмоакустики на закарстованных территориях крупных городов (на примере Москвы и нижнего Новгорода) // Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 9-10. С. 50-62.
3. Романов В.В. Применение инженерной сейсморазведки при оценке карсто-суффозионной опасности на примере Московского региона // В сборнике: Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Москва, 2022. С. 208-210.

4. Романов В.В., Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Судоплатова А.А. Уточнение категории карстовой опасности участков строительства Московской агломерации методами инженерной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2026. № 1 (88). С. 100-104.

5. Романов В.В. Опыт прослеживания отражающих границ на территории Московского региона // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 4 (79). С. 62-69.

6. Романов В.В., Иванов А.А., Шматкова А.А. Опыт применения инженерной сейсморазведки МОВОГТ для оценки карстовосуффозионной опасности на территории Москвы и Московской области // В сборнике: Инженерная сейсморазведка-2018. Сборник тезисов научно-практической конференции. Под редакцией М.Р. Садуртдинова, М.С. Судаковой. 2018. С. 20-24.

7. Романов В.В., Шнеерсон М.Б. Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве // Геофизика. 2018. № 6. С. 75-81.

8. Романов В.В. Из опыта комплексного применения сейсморазведки и георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях на территории Москвы // Инженерные изыскания. 2015. № 5-6. С. 44-49.

9. Шебуняев А. Н., Юдина И. М. Расчет напряженно-деформированного состояния основания в области карстового провала //Инженерный вестник Дона. – 2019. – №. 1 (52). – С. 77.