

УДК 624.131.3

В.Г.РУМЫНИН, д-р. геол.-мин. наук, профессор, *rumynin@hge.ru.ru*

А.М.НИКУЛЕНКОВ, старший научный сотрудник, *annik3@ya.ru*

Институт геоэкологии РАН им. Е.М.Сергеева, Санкт-Петербургское Отделение, Санкт-Петербургский государственный университет

V.G.RUMYNIN, DSc in Geology, Professor, *rumynin@hge.ru.ru*

A.M.NIKULENKOVA, Senior Researcher, *annik3@ya.ru*

E.M.Sergeev Inst. of Environmental Geology of the RAS, Saint Petersburg Div., Saint Petersburg State University

ЗОНАЛЬНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОТЛИНСКИХ ГЛИН ВЕНДСКОЙ СИСТЕМЫ (СЕВЕРО-ЗАПАД РУССКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

Экспериментальные результаты свидетельствуют об определенных тенденциях в изменении физико-механических свойств вендинских глин с глубиной. Сравнительный анализ данных испытания керна показывает четкую корреляционную связь между значениями влажности, плотности и пористости глины и глубиной отбора образцов. Деформационные и прочностные свойства глин также зависят от глубины: модуль деформации и сцепление увеличиваются с глубиной.

Ключевые слова: стабилометрические испытания, деформационные свойства, прочностные свойства, коэффициент фильтрации; анизотропия, девиаторное напряжение.

TENDENCIES IN THE CHANGE IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE VENDIAN CLAY FORMATION (NORTH WESTERN EDGE OF THE RUSSIAN PLATFORM)

The study presents experimental results illustrating a certain tendencies in the change in physical and mechanical properties of the Vendian clay formations over depth. A comparative analysis of samples from different borehole intervals has arrived at significant coefficients of correlation for the parameters that characterize the degree of the clay water saturation, compaction, and consistency with depth (the elevation of the core-bore sample in the profile). The rock deformation and strength parameters also demonstrate a dependence on the depth. The deformation modulus and the shear strength of the clay increase with increase in the depth of sampling.

Key words: stabilometer tests, deformation properties, strength properties, hydraulic conductivity, anisotropy factor; deviator stress.

Введение. На северо-западе Русской платформы широкое распространение имеют глинистые породы высокой степени литификации [1, 2]. К ним, наряду с синими нижнекембрийскими (\in_{1ln}) глинами (возраст 500–530 млн лет), относятся котлинские глины (V_2k) вендинской системы (530–650 млн лет). Вендинские глины котлинского яруса картируются вблизи поверхности в пределах полосы к югу от Финского залива и на Карельском перешейке, а также в районе Санкт-Петербурга

и его окрестностях [3]. Котлинские глины полого погружаются к юго-востоку под согласно перекрывающие их синие нижнекембрийские глины. Под ними находятся вендинский водоносный комплекс и слабо обводненные архейские породы.

Наряду с соляными пластами и монолитными блоками скальных невыветрелых пород, глины находятся в центре внимания специалистов в области обращения с радиоактивными отходами (РАО). В качестве

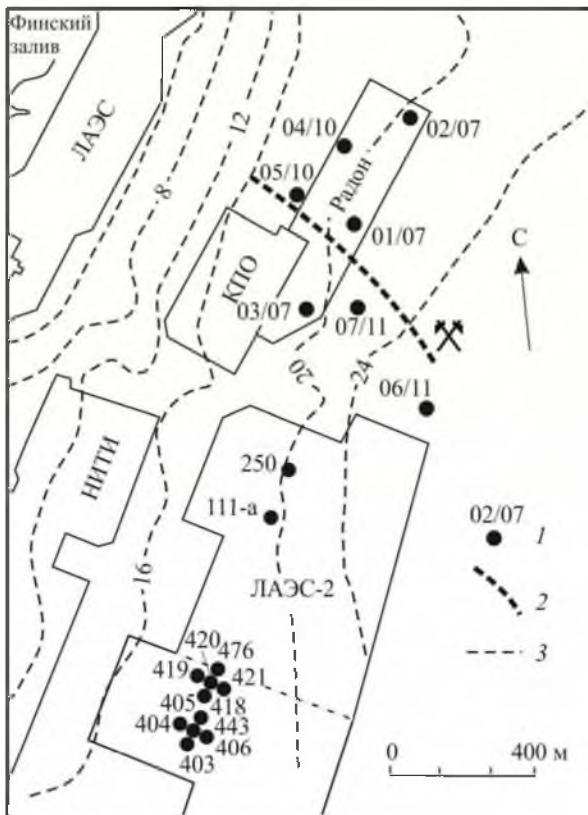


Рис.1. Расположение глубоких инженерно-геологических скважин на участках ЛО СЗТО и ЛАЭС-2

1 – инженерно-геологическая скважина и ее номер; 2 – трасса подземных горных выработок, 3 – гидроизогипса верхнего водоносного комплекса. КПО – комплекс переработки отходов, НИТИ – научно-исследовательский технический институт им. А.П.Александрова

наиболее вероятного кандидата для строительства подземного хранилища РАО на Северо-Западе РФ рассматривается участок, территориально совпадающий с расположением существующего поверхностного хранилища ФГУП «РосРАО» ЛО СЗТО (далее ЛО СЗТО) (рис.1). Вблизи этого участка находится площадка строительства новой Ленинградской атомной станции (ЛАЭС-2), хорошо изученная в геологическом и инженерно-геологическом отношении (рис.1).

1. Механические и фильтрационные свойства глин

Механические свойства глинистой формации изучались в процессе одноосного и трехосного сжатия. Основной объем испытаний выполнен в стабилометрах по консолидированно-дренируемой (КД), неконсолидиро-

ванно-дренируемой (НД) и неконсолидированно-недренируемой (НН) экспериментальным схемам. Полученные результаты позволили определить весь перечень механических параметров, а именно: модуль общей деформации E_0 ; модуль Юнга, E_d ; сопротивление сдвигу, C и угол внутреннего трения, φ ; прочность при одноосном сжатии, σ_c ; коэффициент Пуассона, v (табл.1). Анализируя лабораторные данные, следует иметь в виду, что при подъеме керна на поверхность под действием снятия напряжения в массиве происходит увеличение, по сравнению с естественным залеганием на глубине, раскрытия микротрешин, что может внести некоторые искажения в экспериментально полученные величины параметров. Кроме того, необходимо учитывать, что представленные данные отражают, главным образом, свойства пород при осевых нагрузках вкрест напластования. Эти данные, в силу анизотропии изучаемой среды, отличаются от экспериментальных значений, характеризующих свойства пород вдоль слоистости [4]. Фактор анизотропии, обусловленный микрослоистостью глин, может составлять 2 для модуля общей деформации и 1,3-1,5 для сцепления.

Таблица 1
Физико-механические характеристики глин

Параметры	E_d , изм.	Синие глины*, карьеры	I_{ks} ЛО СЗТО	I_{ks} Метро-1
Сцепление, C	МПа	0,15-0,3	0,2-0,35	2,5-3
Угол внутреннего трения, φ	град	10-20	20-35	10 (?)
Крепость, σ_c	МПа	0,3-0,4	0,9	2,5-7,5
Модуль общей деформации, E_0	МПа	50-60	40-120	970-1300
Коэффициент Пуассона, v	–	0,35-0,4	0,2-0,3	0,2-0,3

* Никольский и Красный Бор

Фильтрационные свойства глинистых толщ определялись по результатам испытания керна, проводившихся в условиях повышенной нагрузки в модифицированной

Таблица 2

**Результаты определения коэффициента фильтрации образцов котлинских глин
в приборах трехосного сжатия**

Номер скважины	Глубина, м	$W, \%$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$\rho_d, \text{г}/\text{см}^3$	σ_3, kPa	Поперек напластования		Вдоль напластования	
						$I, \text{д.е.}$	$k, 10^{-6}, \text{м}/\text{сут}$	$I, \text{д.е.}$	$k, 10^{-6}, \text{м}/\text{сут}$
01/07	65,8-65,95	13,6	2,19	1,90	300	Н.д.	0,5	Н.д.	—
01/07	55,2-55,35	14,2	2,25	1,98	300	Н.д.	0,5	Н.д.	—
04/10	51,8-52,1	15,4	2,16	1,87	500	544	0,6	416	4
04/10	69,2-69,5	11,9	2,22	1,98	700	408	1,4	408	19
05/10	48,6-49,0	14,9	2,23	1,94	480	152	1,3	179	6

установке трехосного сжатия. Из каждого монолита, предназначенного для испытаний, вырезались два образца диаметром 50 мм таким образом, чтобы в одном образце фильтрация осуществлялась по напластованию, в другом – поперек напластования. После установки образец «обжимался» под бытовым давлением, соответствующим давлению вышележащего грунта на глубине отбора монолита. Образец выдерживался до условной стабилизации деформаций, составляющей не более 0,01 мм за 16 ч. После стабилизации проводилось водонасыщение образца снизу вверх путем повышения противодавления до $0,3 \text{ МПа}$ с соответствующим увеличением всестороннего давления в камере (табл.2). Продолжительность опытов составляла несколько недель. Всего было выполнено пять экспериментальных серий.

Полученные значения коэффициента фильтрации (табл.2) поперек напластования находились в диапазоне $0,5-1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{сут}$ ($5,8 \cdot 10^{-12}-1,6 \cdot 10^{-11} \text{ м}/\text{с}$), вдоль напластования – $0,4-1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}/\text{сут}$ ($4,6 \cdot 10^{-11}-2,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}/\text{с}$). Таким образом, глинистый массив характеризуется заметной анизотропией проницаемости. При условии отсутствия трещинной фильтрации в массиве породы характеризуются как весьма слабо проницаемые.

2. Изменение физических и механических свойств с глубиной

Предварительные выводы об изменчивости свойств пород по глубине могут быть получены из анализа данных геофизических исследований скважин (диаграммы гамма-каротажа и удельных кажущихся сопротивлений КС). Этот анализ позволил однознач-

но идентифицировать по характерной аномалии сопротивлений границу перехода от глинистой (верхней) пачки котлинского горизонта к породам с высоким содержанием песчаного материала (нижняя пачка – вендский водоносный комплекс, представленный двумя водоносными горизонтами и разделяющим слоем). Постепенное «опесчанивание» разреза ниже отметки 100 м подтверждается и диаграммой отношения пылеватой фракции к глинистой (рис.2).

Анализ результатов лабораторного исследования керна позволил установить четкую закономерность в пространственном распределении физических и механических свойств изучаемой глинистой толщи. Так, сравнение результатов по образцам, отобранным в различных интервалах разреза, показало (рис.2 *a, b, c*) высокую степень корреляции таких характеристик глин как влажность, плотность и число пластичности с глубиной (а.о. интервала отбора керна). Действительно, как следует из графиков на рис.2, *a* и рис.2,*b*, верхняя зона (I) разреза (до глубин 40-50 м) представлена относительно разуплотненными породами, что связано, очевидно, с влиянием физического выветривания и небольшой нагрузкой от вышележащих покровных отложений. Нижняя зона (II) представлена более плотными и менее влажными породами: породы на глубинах выше 40-50 м были защищены от прямого влияния внешних факторов, таких как ледники и морские трансгрессии и формировались под влиянием веса вышележащих пород. Уменьшение числа пластичности с глубиной (рис.2, *c*) связано с уменьшением содержания тонкодисперсных частиц, что подтверждается ростом отношения $d_{0,01-0,1}/d_{<0,01}$ (рис.2, *c*).

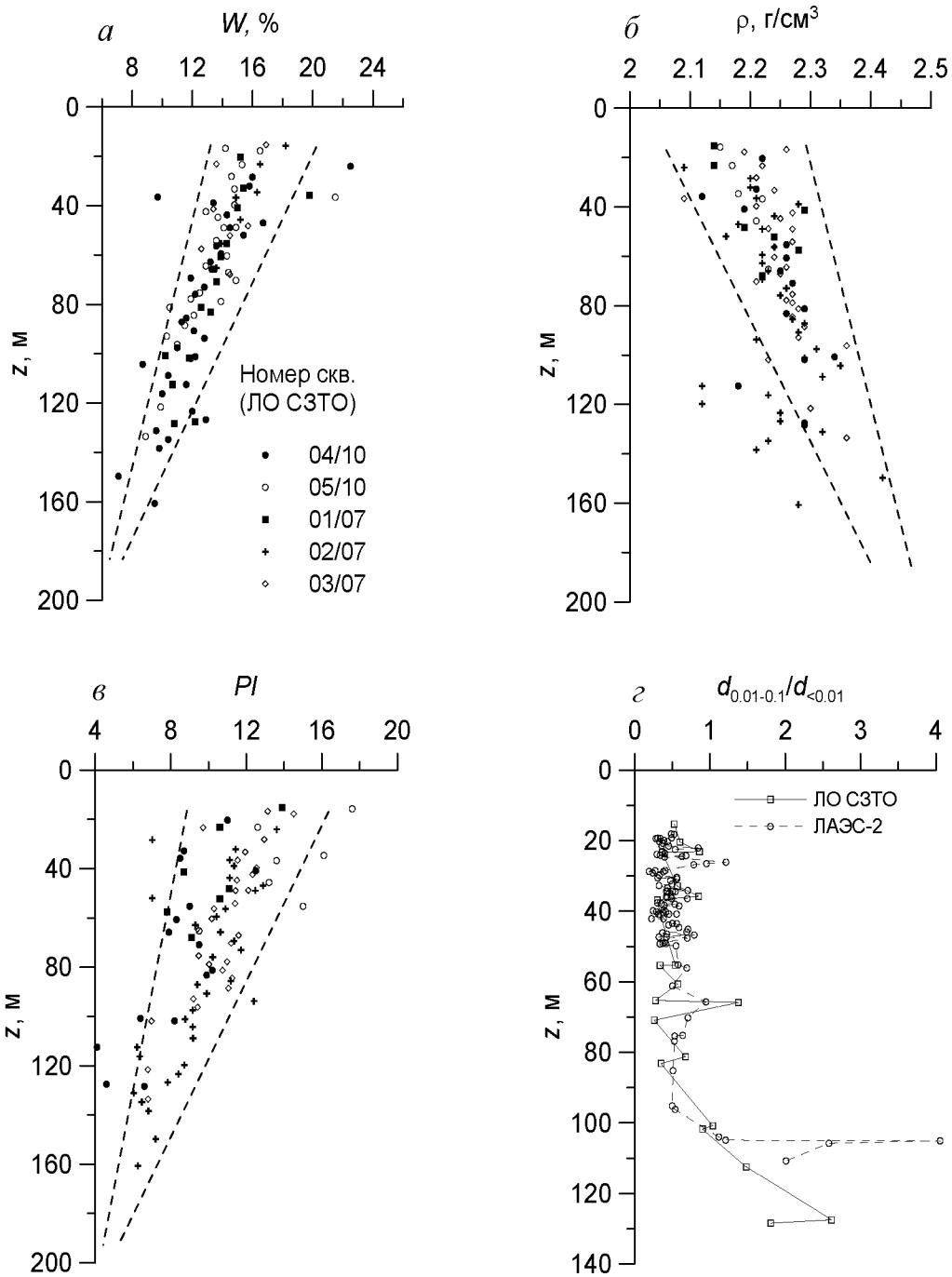


Рис.2. Изменение влажности (α), плотности породы (β), числа пластичности (γ) и отношения $d_{0,01-0,1}/d_{<0,01}$ (ε) с глубиной (глины V_k)

Вполне ожидаемыми оказались результаты трехосных испытаний образцов глин, отобранных из инженерно-геологических скважин на участках ЛАЭС-2 и ЛО СЗТО. Учитывая близкое расположение участков, их практически идентичное геологическое строение, близость вод-

но-физических свойств пород, минералогического и гранулометрического состава, испытанные породы могут быть отнесены к одному инженерно-геологическому комплексу. Результаты всех определений механических характеристик глинистых грунтов можно рассматривать совместно.

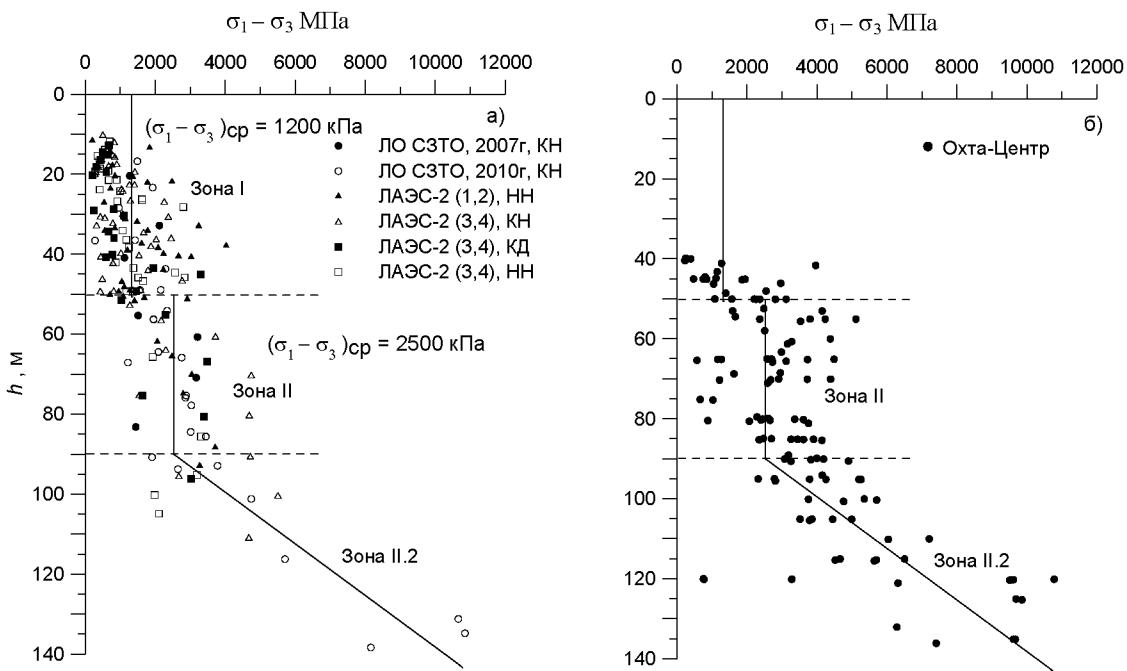


Рис.3. График зависимости разности осевых разрушающих и объемных напряжений $q_p = \sigma_1^p - \sigma_3^p$ от глубины отбора образца. Обобщенные данные испытаний КД, КН и НН: а – площадки ЛАЭС-2, ЛО СЗТО, г.Сосновый Бор; б – площадка Охта-центр, Санкт-Петербург

В то же время анализ полевого материала и данных лабораторных испытаний породных проб, отобранных из различных интервалов скважин (рис.3), не позволяют отнести данную совокупность к единой статистической выборке с точки зрения устойчивости получаемых значений C и ϕ .

Действительно, анализ данных стабилометрических испытаний выявил явную тенденцию увеличения прочности пород с глубиной (рис. 3). Графики на рис.3 а и б отражают зависимость пиковой разности максимальных и минимальных напряжений, $q_p = \sigma_1^p - \sigma_3^p$ («пиковое девиаторное напряжение»), от глубины и влажности породы. Установленная

тенденция отвечает случаю глинистой формации, показатели сопротивления на сдвиг которой растут с глубиной. На рис.3, б представлен девиаторный график, построенный по результатам опытного изучения котлинских глин на участке «Охта-центр». Как видно, изменения прочностных свойств пород, выявленные на двух площадках, подчиняется одним и тем же закономерностям.

Интерпретация полученных диаграмм прочности отдельных видов испытаний дает значения параметров прочности, представленные в табл.3.

С глубиной меняются также деформационные свойства пород (рис.4). Так, мо-

Таблица 3

Средние значения параметров по результатам обработки данных трехосных испытаний образцов:
ЛО СЗТО (2007, 2010 гг.), ЛАЭС-2 (2005–2008 гг.)

Схема испытаний	Зона I: А.о. > -30 – 40 м			Зона II: А.о. < -30 – 40 м		
	C , кПа	ϕ , град	N	C , кПа	ϕ , град	N
КН	279,4	18,1	48	265,5	32,1	26
НН	184,5	23,2	30	354,6	27,6	16
КН+НН	231,9	20,7	78	310	29,8	42
КН+НН+КД	199,4	21	96	256,7	34,5	48

Примечание: А.о. – абсолютные отметки; N – число испытаний.

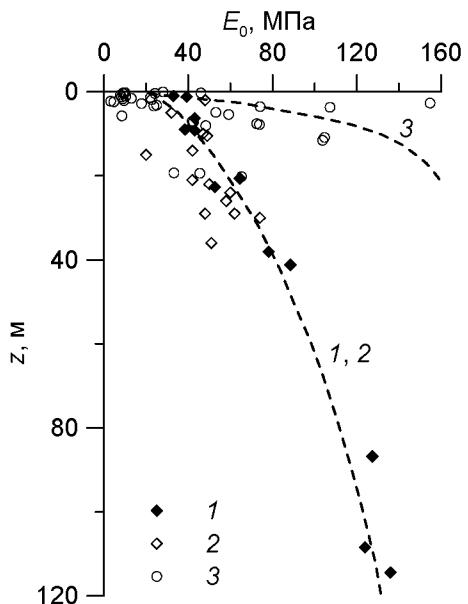


Рис.4. Изменение модуля деформации

1 – ЛО СЗТО; 2 – ЛАЭС-2; 3 – Санкт-Петербургский метрополитен (верхняя 20-метровая часть разреза). Штриховые линии – качественная аппроксимация опытных точек. Координата $z = 0$ отвечает кровле глин

дудль их деформации увеличивается с глубиной отбора (рис.4), что говорит о снижении степени сжимаемости пород на больших глубинах (зона II) по сравнению с приповерхностной зоной I.

Выводы

В настоящей работе приведена информация о лабораторных исследованиях физико-механических свойств вендских глин для участка ЛО СЗТО и ЛАЭС-2, согласно проведенным исследованиям, можно выделить две зоны:

а) верхнюю – относительно разуплотненных глин (от кровли глинистой толщи до глубин 50-60 м.);

б) нижнюю – относительно прочных глин (глубже 50-60 м).

Для оценки физико-механических свойств глин было проведено 157 испытаний, для определения физических свойств – 188.

Увеличение прочности пород и уменьшение из сжимаемости связано с возрастанием степени песчанистости с глубиной и увеличением напряжений в толще глин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дашико Р.Э. Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка нижнекембрийских синих глин как среды размещения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2006. № 3. С.235-241.
2. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства нижнекембрийских глин северо-западной окраины Русской платформы // Зап. Ленинградского горного ин-та. 1958. Т.34. Вып.2. С.154-189.
3. Недра России. Т.2. Экология геологической среды / Под ред. Н.В.Межеловского и А.А.Смыслова. СПб – М., 2002. 662 с.
4. Протосеня А.Г., Огородников Ю.Н., Деменков П.А., Карасев М.А., Лебедев М.О., Потемкин Д.А., Козин Е.Г. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг. СПб, 2011. 355 с.

REFERENCES

1. Dashko R.E. Engineering-and-geological and geoecological assessment of the Low Cambrian clay as a medium for radioactive waste disposal // Geoecology. 2006. N 3. P.235-241.
2. Lomtadze V.D. Physical-and-mechanical properties of the Low Cambrian clay of the North Western Edge of the Russian Platform. // Mining Institute Bulletin. 1958. Vol.34, N 2. P.154-189.
3. The Interior of Russian Federation. Eds.: N.V.Mezhelovsky and A.A.Smyslov Saint Petersburg – Moscow. 2002. 662 p.
4. Protosenya A.G., Ogorodnikov Yu.N. Mechanics on the underground constructions. Spatial models and monitoring. Saint Petersburg, 2011. 355 p.