

УДК 624. 131. 22.

**ПРОГНОЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ САРМАТСКИХ ГЛИН ОСНОВАНИЙ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ОБВОДНЕНИИ**

Ю.И. Олянский, Е.В. Щекочихина, С.А. Калиновский, Е.А. Степанова

**FORECAST OF INDEXES OF STRENGTH OF SARMAT CLAYS OF BASES OF
HYDROTECHNICAL STRUCTURES WITH LONG-TERM DRILLING**

Yu.I. Olyansky, E.V. Shchekochikhina, S.A. Kalinovsky, E.A. Stepanova

Аннотация. Одной из важнейших проблем гидротехнического строительства на глинистых (в том числе – набухающих) грунтах является прогнозирование их поведения в основаниях сооружений, подвергающихся длительному воздействию воды при техногенном подтоплении. Авторами проанализированы результаты лабораторных экспериментов по моделированию процессов диффузионного выщелачивания незасоленных сарматских глин, выполненные сотрудниками кафедры гидротехнических и земляных сооружений ВолгГТУ и предложена методика прогноза показателей прочности выщелоченных глин. Суть этой методики состоит в том, что использована типизация указанных глин по устойчивости к обводнению, разработанная Ю.И. Олянским (2004). Для каждого из четырёх выделенных автором типов глин по устойчивости к обводнению предложены коэффициенты пересчёта показателей удельного сцепления и угла внутреннего трения, именуемых коэффициентами устойчивости к обводнению.

Ключевые слова: сарматские глины; диффузионное выщелачивание; типизация по устойчивости к обводнению; метод вероятностных аналогий; инженерно-геологические изыскания.

Abstract. One of the most important problems of hydrotechnical construction on clay (including swelling) soils is the prediction of their behavior in the foundations of structures exposed to prolonged exposure to water in anthropogenic flooding. The authors analyzed the results of laboratory experiments on the modeling of diffusion leaching of non-saline Sarmatian clays performed by the staff of the Department of Hydraulic Engineering and Earthworks of VolgGTU and proposed a technique for predicting the strength of leached clay. The essence of this technique is that the typing of these clays according to the stability to watering, developed by Yu.I. Olyansky (2004). For each of the four types of clays allocated by the author for stability to watering, coefficients for recalculating the indices of specific adhesion and the angle of internal friction, called the coefficients of water resistance, are proposed.

Key words: Sarmatian clays; diffusion leaching; typification of water resistance; the method of probability analogies; engineering and geological survey.

Вследствие промышленно-хозяйственного освоения территорий изменяется режим подземных вод, увеличивается влажность глинистых пород, может происходить подтопление ведущее к набуханию грунтов в основаниях сооружений и образованию оползней на склонах.

Сарматские отложения достаточно широко распространены на территории России и сопредельных государств. Они находятся в пределах глубин активных зон фундаментов инженерных сооружений на территории от Карпат до Прикаспия. Наибольшую проблему для строительства представляют набухающие глины, относящиеся к структурно-неустойчивым грунтам, которые при изменении влажности меняют свои строительные свойства. Существенно повышается сжимаемость и уменьшается прочность. В настоящее время отсутствует единая общепринятая методика прогнозирования показателей свойств глин в основаниях инженерных сооружений при их увлажнении и длительном взаимодействии с

водой, сопровождаемым диффузионным выщелачиванием. Методы прогноза прочности глин на основе их кратковременного замачивания, применяемые в проектно-изыскательных организациях, не могут обеспечить надёжные значения показателей удельного сцепления и угла внутреннего трения, т.к. не учитывают изменения состава и свойств глин, происходящие в течение продолжительного времени взаимодействия последних с водой. Таким образом, актуальность исследований заключается в разработке методики прогноза устойчивости сарматских глин в основаниях инженерных сооружений при длительном обводнении.

Обзор основных существующих методов инженерно-геологического прогнозирования

Инженерно-геологический прогноз - это научно обоснованное высказывание о строении, состоянии и поведении инженерно-геологической системы, опирающейся на закономерности и тенденции существования и развития этой системы.

Только при использовании основных законов инженерной геологии прогнозирование может быть сделано. Они формулируются следующим образом [1]:

1. *Закон соответствия.* Инженерно-геологическая система возникает в результате взаимодействия геологических, гидрогеологических и других компонентов природной среды и объектов, создающих внешнее влияние на них. Каждое внешнее воздействие при этом формирует определённую инженерно-геологическую систему в данных природных условиях.

2. *Закон унаследованности.* Поведение инженерно-геологической системы при данном внешнем воздействии полностью определяется историей её развития.

3. *Закон взаимообусловленности.* Внешнее воздействие на любую составляющую инженерно-геологической системы в той или иной мере передаётся остальным составляющим.

4. *Закон адаптации.* Любая инженерно-геологическая система стремится прийти в равновесие с внешним воздействием путём саморегуляции.

5. *Закон устойчивости.* Устойчивость инженерно-геологической системы тем больше, чем меньше размеры области влияния, а также величина и интенсивность внешнего воздействия.

Разное внешнее воздействие оказывает различное влияние на одну и ту же геологическую среду и наоборот – разная геологическая среда неодинаково влияет на объекты, генерирующие одно и то же внешнее воздействие. Поэтому для оценки условий работы различных внешних воздействий требуются разные методические подходы, содержание и состав инженерно-геологических исследований.

Инженерно-геологические изыскания в общем случае проводятся для выбора района, участка, площадки строительства и на выбранной площадке. Нередко инженерно-геологический прогноз необходим и в процессе эксплуатации сооружений. Задачи а значит содержание и методика составления прогноза изменяются в зависимости от этапа проектирования и типа внешнего воздействия. Взаимное влияние инженерно-геологического прогноза и проектного решения является особенностью инженерно-геологического прогнозирования.

Инженерно-геологическое прогнозирование должно выполняться на всех этапах инженерно-геологических исследований, начиная от разработки программы. Первый этап разработки прогноза начинается с получения задания на проведение инженерно-геологических изысканий, которое должно содержать указания о предполагаемых параметрах, назначения и специфике работы как проектируемого сооружения в целом, так и его отдельных частей. Затем необходимо предварительно оценить сферу возможного влияния проектируемого сооружения, установить необходимые для проектирования характеристики инженерно-геологической обстановки, определить требуемую точность

оценки этих характеристик и др. Из такого задания вытекают цели прогнозирования (оценка инженерно-геологических условий строительства, устойчивости склона и т.д.) и выявляется объект прогнозирования (площадка размещения сооружения, берег водохранилища и пр.). Потом, используя существующие теоретические представления о закономерностях развития объекта прогнозирования, а также о взаимодействии последнего и внешнего воздействия, фондовые материалы, включающие данные об аналогичных объектах, строится предварительный инженерно-геологический прогноз. На его базе составляется программа изысканий, намечаются объёмы и выбираются методы их проведения. Объём исследований должен обеспечить решение задачи соответствия с принципом *поиска и оценки определяющего звена*, т.е. факторов, определяющих работу сооружения и выявленных совместно с заказчиком на первом этапе прогнозирования.

В процессе выполнения инженерно-геологических исследований прогноз, составленный ранее, уточняется, изменяется или даже отвергается. Соответственно, нужно вносить коррективы и в программу работ. Полученные в процессе изысканий данные могут уточнить теоретические представления, положенные в основу предварительного прогноза применительно к конкретным условиям.

Изыскания завершаются составлением окончательного (для данного этапа) инженерно-геологического прогноза, на основании которого даются рекомендации по обеспечению нормального функционирования системы сооружения – основание, достигаемого наименьшими затратами.

В строительный период уточняют некоторые характеристики инженерно-геологических условий, что позволяет проверить ранее сделанные прогнозы и скорректировать их. В процессе эксплуатации сооружений получают материал, позволяющий судить о правильности прогнозов, рекомендаций и, в определённой мере, о методах и методике исследований, и прогнозирования. Тип сооружения и особенности природной обстановки обуславливают выбор метода прогнозирования и соответствующий объём исследований.

Методы прогнозирования показателей физико-механических свойств пород

Метод геологических аналогий. В основе метода геологических аналогий лежит закон унаследованности. Согласно этому закону состав и физико-механические свойства полностью определяются историей тектонического развития данного региона или области, которая, в свою очередь, обуславливает геологическое и гидрогеологическое строение, рельеф и в некоторой степени, климатические особенности. Отсюда следует, что породы, геологическая история которых одинакова, обладают одними и теми же показателями состава и свойств.

Важными прогностическими признаками являются условия залегания. Характер залегания пород на склонах определяет условия их дренажа, а значит влажность, плотность и зависящие от них прочность и деформируемость. Особенности залегания обуславливают также глубину проникновения агентов выветривания. Так, например, если породы падают вглубь склона, изменения свойств выражены ярче, а зона выветривания мощнее. При прогнозировании необходимо учитывать мощность слоя и степень неоднородности разреза.

Важнейшими прогнозными признаками являются вещественный состав пород и их структурно-текстурные особенности, которые выступают уже в качестве предикторов показателей физических и механических свойств. В свою очередь, показатели физических свойств также служат для прогноза механических свойств.

Обводнение обычно способствует ухудшению свойств, в связи с ослаблением связей между частицами, слагающими породу, возникновения порового и гидродинамического давления, а также взвешивающего действия воды. Обводнение, а также фильтрация могут привести к изменению обменного комплекса, а высыхание – к растрескиванию и в соответствующих условиях к засолению пород.

Метод вероятностных аналогий. Данный метод применяется главным образом для прогноза показателей одних свойств, экспериментальное определение которых связано с техническими трудностями, по другим легко определяемым характеристикам. Такой прогноз выполняется с помощью регрессивно-корреляционного анализа зависимостей, устанавливаемых на основании опытов, в ходе которых, совместно получают первые и вторые показатели. Регрессионная модель может содержать одну или несколько переменных. В последнем случае для нахождения коэффициентов регрессионного уравнения приходится проводить более сложные вычисления, но точность оценки прогнозируемой характеристики повышается.

Метод модельных аналогий. Этот метод применяется при прогнозировании физико-механических свойств пород с использованием результатов лабораторных и полевых экспериментов. Лабораторное моделирование выполняют на образцах, которые отбирают практически из любой точки основания сооружения. Моделирование должно проводиться так, чтобы отразить работу породы при различных внешних воздействиях. В полевых условиях в область моделирования включают типичные элементы изучаемой породы, несмотря на то, что объём породы, изучаемой в полевом эксперименте, значительно больше, чем при лабораторных опытах, но неизмеримо меньше массива породы, вовлекаемого в работу сооружением. Важно представлять, что при подготовке площадки для проведения полевого опыта естественное сложение породы нарушается, и иногда существенно, что может отразиться на результатах моделирования.

Метод натуральных аналогий. При прогнозировании показателей свойств рассматриваемым методом в качестве аналогов могут выступать уже изученные породы, на которых были построены сооружения, или вовлечённые в оползание, обвал и т.п.

Метод расчётных аналогий. Этот метод применяется при прогнозировании физических, водных и механических свойств пород. Наиболее часто выполняется расчёт плотности сухого грунта и влажности породы G более 0,90. Если $G \approx 1$, то при достоверно известных плотности и влажности величина объёмной массы может быть вычислена с большой точностью.

Метод экспертных аналогий. Данный метод применяется при прогнозировании показателей физико-механических свойств пород. При отсутствии или недостаточном объёме материалов исследований пород характеристики их свойств назначаются специалистом, который выступает в качестве единоличного эксперта, исходя из своего опыта и знания предмета.

Прогноз прочности сарматских глин в основаниях гидротехнических сооружений при длительном обводнении.

Одной из главных задач инженерно-геологического обоснования хозяйственного освоения территории и размещения строительных объектов является оценка физико-механических свойств грунтов оснований на время проектирования объектов и после начала их эксплуатации в условиях активного обводнения и подтопления. В настоящее время отсутствует единая общепринятая методика прогноза изменения показателей прочности глинистых грунтов после их водонасыщения. Метод прогноза на основе лабораторных испытаний грунтов в условиях неконсолидированного среза после его кратковременного водонасыщения, широко используемый в изыскательских организациях, имеет существенный недостаток — нет учёта изменений вещественного состава и состояния глинистого грунта, которые происходят при длительном воздействии воды. Как показали наши исследования и других авторов, эти изменения весьма существенны. У набухающих глин длительное диффузионное выщелачивание ведёт к изменению степени и вида засоления, дисперсности, состава обменных катионов. При этом глины претерпевают дополнительное разуплотнение, повышается давление набухания, снижается их прочность [2, 3].

Определение физико-механических характеристик грунтов, посредством лабораторного комплекса АСИС, установленного в ВолгГТУ, подтверждает изменение свойств любых глинистых грунтов с течением времени (данные о прочности которых в прошлом можно обнаружить в архивах специализированных организаций).

Предлагаемый метод прогнозирования изменения показателей прочности глин в условиях длительного воздействия воды основывается на использовании ограниченного числа показателей свойств. Факторами прогнозирования являются: природная влажность W , предел текучести W_L , плотность сухого грунта ρ_d , величина свободного набухания ε_{sw} . Методика прогноза заключается в решении 2-х задач: определения типа глин по устойчивости к обводнению (по классификации Ю.И Олянского, 2004) и расчете прогнозных значений показателей прочности глин после их взаимодействия с водой [4].

Для определения типа глин по устойчивости к обводнению составлены по району-аналогу таблицы эмпирических оценок вероятностей основных показателей свойств, имеющихся в распоряжении любой проектно-изыскательской организации: W , W_L , ρ_d , ε_{sw} (Таблица 1). Определение типа по устойчивости может проводиться с использованием метода вероятностных аналогий, в основе которого лежит теорема Байеса, формулируемая следующим образом. Пусть A_1, A_2, \dots, A_j — попарно несовместимые события, хотя бы одно из которых обязательно наступит, B_i — некоторые события. Тогда вероятность реализации событий A_j , при условии, что наступит событие B_i , выражается формулой:

$$P_{(A_j/B_i)} = \frac{P_{(A_j)} \prod_{i=1}^n P_{(B_i/A_j)}}{\sum_{j=1}^m P_{(A_j)} \cdot \prod_{i=1}^n P_{(B_i/A_j)}}$$

где $P_{(A_j/B_i)}$ — условная вероятность события A_j при фактическом наступлении события B_i ; $P_{(B_i/A_j)}$ — вероятность реализации события B_i при данном A_j ; $P_{(A_j)}$ — априорная вероятность наступления события A_j , равная: 0,21, 0,38, 0,29, 0,12 — для I...IV типа глин по устойчивости соответственно [5].

Расчет прогнозных значений показателей прочности глин после их длительного взаимодействия с водой выполняется с использованием корректировочных коэффициентов, рекомендуемых авторами:

I тип	$K_{уст,с} = 0,22;$	$K_{уст,ф} = 0,55;$
II тип	$K_{уст,с} = 0,31;$	$K_{уст,ф} = 0,67;$
III тип	$K_{уст,с} = 0,44;$	$K_{уст,ф} = 0,88;$
IV тип	$K_{уст,с} = 0,74.$	$K_{уст,ф} = 0,90.$

Таблица 1 – Эмпирические оценки вероятностей прогнозных факторов для прогнозирования устойчивости незасоленных сарматских глин к обводнению

Прогнозные факторы	Типы по устойчивости к обводнению			
	I	II	III	IV
Влажность на пределе текучести, W_L				
более 0,7	0,02	0,01	0,02	0,01
0,7-0,6	0,04	0,03	0,05	0,01
0,6-0,5	0,11	0,17	0,05	0,01
0,5-0,4	0,04	0,13	0,08	0,05
менее 0,4	0,01	0,03	0,08	0,05

Продолжение таблицы 1

Природная влажность, W				
менее 0,20	0,05	0,09	0,09	0,03
0,20-0,24	0,10	0,18	0,06	0,04
0,24-0,28	0,05	0,12	0,07	0,02
0,28-0,32	0,01	0,01	0,01	-
более 0,32	0,01	-	0,05	0,01
Плотность «сухого» грунта, ρ_d г/см ³				
менее 1,2	-	-	0,01	0,01
1,2-1,4	0,01	-	0,03	0,02
1,4-1,6	0,04	0,06	0,04	0,05
1,6-1,8	0,16	0,28	0,15	0,03
более 1,8	0,01	0,04	0,04	0,02
Величина свободного набухания, ε_{sw}				
менее 0,04	-	-	0,08	0,09
0,04-0,12	0,02	0,13	0,14	0,03
0,12-0,20	0,05	0,15	0,06	-
0,20-0,28	0,07	0,09	-	-
более 0,28	0,08	0,01	-	-
Наличие пирита				
не содержится	0,05	0,15	0,25	0,05
содержится	0,05	0,10	0,15	0,20
Квазиаприорная вероятность	0,21	0,38	0,29	0,12

Пример прогноза показателей прочности глин, не содержащих включений пирита, подвергшихся длительному воздействию воды

В результате инженерно-геологических изысканий на площадке вскрыт слой набухающих сарматских глин. Нормативные значения показателей свойств следующие:

$$\begin{aligned}
 W &= 0,19; & J_p &= 0,29; & \varepsilon_{sw} &= 0,11; \\
 W_L &= 0,52; & \rho_o &= 2,00 \text{ г/см}^3; & c_n &= 0,08 \text{ МПа}; \\
 W_p &= 0,23 & \rho_d &= 1,68 \text{ г/см}^3 & \varphi_n &= 16^\circ.
 \end{aligned}$$

Площадка является подтопляемой территорией. В связи с этим следует дать прогноз изменения показателей c_n и φ_n на длительный период эксплуатации сооружения (до 25 лет).

Определение типа глин по устойчивости осуществляется согласно таблице 2.

Таблица 2 – Пример расчета вероятности гипотез о принадлежности глин к различным типам по устойчивости к обводнению

Типы Глин	$P_{(A_j)}$	Вероятность признаков					$P_{(A_j)} \prod_{i=1}^n P_{(B_i/A_j)}$	$P_{(A_j/B_i)}$
		W_L	W	ρ_o	ε_{sw}	Наличие пирита		
I	0,21	0,11	0,05	0,16	0,02	0,05	0,0000002	0,005
II	0,38	0,17	0,09	0,28	0,13	0,15	0,000032	0,816
III	0,29	0,05	0,09	0,15	0,14	0,25	0,000007	0,179
IV	0,12	0,01	0,03	0,03	0,03	0,50	0	0
Итого							0,00003923	1,000

Тип изучаемых глин определяется по максимальной вероятности (0,816) как II. Прогноз показателей прочности выполняется по корректировочным коэффициентам:

$$K_{уст,с} = 0,31; \quad K_{уст,ф} = 0,67;$$

Нормативные значения показателей прочности глин после длительного обводнения равны:

$$c_H^B = 0,08 \cdot 0,31 = 0,025 \text{ (МПа)};$$

$$\varphi_H^B = 16^\circ \cdot 0,67 = 11^\circ.$$

Выводы

Прогноз показателей прочности глин, при их обводнении в основаниях гидротехнических сооружений может осуществляться методом вероятностных аналогий с использованием типизации глин по устойчивости к длительному воздействию воды и рассчитанных эмпирических оценок вероятностей прогнозных факторов для территории – аналога.

Предлагаемая методика прогнозирования показателей прочности глин в условиях длительного взаимодействия с водой, разработанная на примере сарматских глин междуречья Прут-Днестр, может использоваться и в других регионах Северного Причерноморья, где указанные грунты служат основанием инженерных сооружений. А так же может иметь научно-методическое значение при оценке глин иного генетического типа в других регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каган А.А. Инженерно-геологическое прогнозирование. М. Недра. 1984. 196 с.
2. Монюшко А.М., Олянский Ю.И. Инженерно-геологические особенности сармат-меотических глин Молдовы. Кишинев: Штиинца, 1991. 172 с.
3. Особенности инженерного освоения территорий, сложенных дисперсными структурно-неустойчивыми грунтами (просадочными и набухающими) / А.Н. Богомолов, Ю.И. Олянский, Е.В. Щекочихина, О.Г. Садчикова, С.И. Шиян // Инженерная геология. 2009. № 3. С. 28-30.
4. Прогноз прочности сарматских глин при длительном обводнении / А.Н. Богомолов, Ю.И. Олянский, Е.В. Щекочихина // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 2. С. 19-24.
5. Оценка устойчивости сармат-меотических глин к длительному обводнению / Ю.И. Олянский, А.Н. Богомолов, С.И. Шиян, Е.В. Щекочихина // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 1. С. 62-68.

REFERENCES

1. Kagan M. *Inzhenerno-geologicheskoe prognozirovanie*. [Engineering-geological forecasting]. A.A. Nedra. 1984. 196 p.
2. Monyushko A.M., Oliansky Yu.I. *Inzhenerno-geologicheskie osobennosti sarmat-meoticheskikh glin Moldovy* [Engineering-geological features of the sarmat-meotic clay of Moldova]. Chisinau: Shtiintsa, 1991. 172 p.
3. Bogomolov A.N., Olyansky Yu.I., Shchekochikhina E.V., Sadchikova O.G., Shiyan S.I. *Osobennosti inzhenernogo osvoeniya territorij, slozhennyh dispersnymi strukturno-neustojchivymi gruntami (prosadochnymi i nabuhayushchimi)*. [Features of engineering development of territories composed of dispersed structurally unstable soils (subsidence and swelling)] *Inzhenernaya geologiya*. 2009. № 3. P. 28-30.

4. Bogomolov A.N., Olyansky Yu.I., Schekochikhina E.V. *Prognoz prochnosti sarmatskih glin pri dlitel'nom obvodnenii* [Prognosis of the strength of the Sarmatian clays during prolonged watering]. *Bases, foundations and mechanics of soils*. 2018, No. 2. pp. 19-24.

5. Olyanskii Yu.I., Bogomolov A.N., Shiyan S.I., Shchekochikhina E.V. *Ocenka ustojchivosti sarmat-meoticheskikh glin k dlitel'nomu obvodneniyu* [Evaluation of the stability of the sarmat-meotic clays to prolonged watering]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2010. No. 1, pp. 62-68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Олянский Юрий Иванович

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, доктор геолого-минералогических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой гидротехнических и земляных сооружений.

E-mail: olyansk@list.ru

Olyansky Yury Ivanovich

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, acting. Head of the Department of Hydraulic and Earthworks.

E-mail: olyansk@list.ru

Щекочихина Евгения Викторовна

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидротехнических и земляных сооружений.

E-mail: evg-schek@yandex.ru

Schekochikhina Evgenia Viktorovna

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulic and Earthworks.

E-mail: evg-schek@yandex.ru

Калиновский Сергей Андреевич

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры гидротехнических и земляных сооружений.

E-mail: sk0522@yandex.com

Kalinovsky Sergey Andreevich

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulic and Earthworks.

E-mail: sk0522@yandex.com

Степанова Екатерина Александровна

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, старший преподаватель кафедры гидротехнических и земляных сооружений.

E-mail: ekserstepan@bk.ru

Stepanova Ekaterina Alexandrovna

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Senior Lecturer of the Department of Hydraulic Engineering and Earthworks.

E-mail: ekserstepan@bk.ru



Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи:
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ИАиС ВолГТУ, кафедра
«Гидротехнические и земляные сооружения» (А-144), Олянский Ю.И.
8(8442) 96-98-87