

УДК 552.52

ОЦЕНКА НАБУХАЮЩИХ СВОЙСТВ ГЛИН НА ТЕРРИТОРИИ Г. КАРАГАНДА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Вдовкина Дарья Игоревна¹,
daryavdovkina@gmail.com

Кошляков Алексей Евгеньевич²,
kosh57@ukr.net

Пономарева Марина Викторовна¹,
mv_ponomareva18@mail.ru

Пономарева Екатерина Вадимовна¹,
evmussina1992@gmail.com

¹ Карагандинский технический университет,
Казахстан, 100012, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56/1.

² Киевский национальный университет им. Т. Шевченко,
Украина, 03022, г. Киев, ул. Васильковская, 90.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления зависимости набухания глин от их физических характеристик с целью сокращения временных и денежных ресурсов при проведении инженерно-геологических изысканий. Активное развитие строительной отрасли приводит к тому, что осваиваются территории, сложенные грунтами, которые в результате увлажнения увеличиваются в объеме – набухают.

Целью исследования является установление зависимости относительного набухания глинистых пород от их физических характеристик, на определение которых затрачиваются минимальные ресурсы, с применением методов машинного обучения.

Объекты: четвертичные и неогеновые глины г. Караганда, которые слагают геологический разрез территорий, используемых для строительства зданий и сооружений.

Методы: создание базы данных лабораторных (физические и компрессионные характеристики, гранулометрический состав) и полевых (описание грунтов – цвет, наличие включений, определение уровня подземных вод, интервалы отбора проб) исследований глин в excel; применение высокоуровневого языка программирования «Python» для создания математических моделей посредством дистрибутива «Anaconda»; применение теоремы Парето с целью разделения данных для обучения и валидации, полученной модели; использование показателя «Mean Squared Error» для оценки адекватности построенных моделей.

Результаты. Построены три прогностические модели относительного набухания глин. Входными данными являлись лабораторные и геологические параметры 103 образцов глин, отобранных в результате инженерно-геологических изысканий в г. Караганда. Применялись следующие алгоритмы машинного обучения: Random forest, Multilinear regression, Support vector machines. По оценке критерия «Mean Squared Error» для построения модели относительного набухания была выбрана модель Random Forest.

Ключевые слова:

Глинистые породы, глины, набухание, модель относительного набухания, четвертичные отложения, неогеновые отложения.

Введение

В последние годы в Республике Казахстан происходит активный экономический рост строительной отрасли. Объем выполненных строительных работ с 2010 по 2019 гг. увеличился с 1,9 до 4,4 триллионов тенге [1]. Усложняются конструкции зданий и сооружений гражданского и промышленного строительства, что в свою очередь требует ужесточения требований к проведению предпроектных работ. Особого внимания при проведении инженерно-геологических исследований требуют специфические грунты, такие как набухающие глины. Основания, сложенные специфическими грунтами, должны проектироваться с учетом способности данных грунтов увеличиваться в объеме при повышении влажности и уменьшаться при высыхании. При набухании увеличивается пористость породы и ее влажность в связи с увеличением толщины гидратных оболочек на поверхности глинистых частиц. Происходит сниже-

ние ригидности глин, которое объясняется экстракцией связанной воды и приводит к модификации внутренней структуры породы [2].

Набухание зависит от минералогического и гранулометрического составов пород. Наличие грубообломочных включений способствует боковому расширению грунта и уменьшает его набухание по вертикали [3]. Из глинистых минералов наибольшим набуханием характеризуются минералы группы монтмориллонита, наименьшим – минералы группы каолинита [4]. Недооценка набухающих грунтов является причиной повреждения многих промышленных и гражданских сооружений. Главной особенностью набухающих грунтов является резкое снижение их несущей способности при замачивании [5].

Специфические грунты распространены по всему миру, и многочисленный ущерб, который был получен в результате их набухающих свойств, зарегистрирован в таких странах, как Саудовская Аравия, Гер-

мания, Испания, Франция, США [6–8]. В том числе такой ущерб зафиксирован в г. Караганда, Казахстан. В 2012 г. произошло обрушение четырех пятиэтажных секций восьми-секционного жилого комплекса «Бесоба» [9]. Большая часть ущерба, связанного со специфическими грунтами, вызвана не отсутствием соответствующих инженерных решений, а невыявлением таких грунтов и недооценкой масштабов их распространения по площади работ на ранних этапах планирования строительных проектов [10].

Таблица 1. Эмпирические зависимости для оценки набухания грунтов

Table 1. Empirical relationships for estimating soil swelling

$\varepsilon_{sw}=1,00+0,006 \cdot (C+I_p-w)$ [6]
$\varepsilon_{sw}=2,16 \cdot 10^{-3} \cdot I_p^{2,44}$
$\varepsilon_{sw}=3,60 \cdot 10^{-5} \cdot (A_c)^{2,44} \cdot (C)^{3,44}$
$\varepsilon_{sw}=4,13 \cdot 10^{-4} \cdot (\varepsilon_{sl})^{2,67}$ [12]
$\varepsilon_{sw}=4,57 \cdot 10^{-5} \cdot [\varepsilon_{sl} / (C-13)]^{2,67} \cdot (C)^{3,44}$
$\varepsilon_{sw}=4,113 \cdot 10^{-4} \cdot [\varepsilon_{sl} / (C-13)]^{2,67} \cdot (C)^{3,44}$ [13]
$\text{Log} \varepsilon_{sw}=(1/12) \cdot (0,4 \cdot W_L-w+5,5)$
$\text{Log} \varepsilon_{sw}=(1/19,5) \cdot (6,242 \cdot p_d+0,65 \cdot W_L-130,5)$ [14]
$\varepsilon_{sw}=82,56 \cdot \alpha^{0,821}$ [15]
$\varepsilon_{sw}=7,5-0,8 \cdot w+0,203 \cdot C$ [16]
$\varepsilon_{sw}=2,77+0,131 \cdot W_L-0,27$ [17]
For $I_p \geq 40$:
$\varepsilon_{sw}=23,82+0,7346 \cdot I_p-0,1458 \cdot 0,3 \cdot H-1,7 \cdot w+0,0025 \cdot I_p \cdot w-0,00884 \cdot I_p \cdot 0,3 \cdot H$
For $I_p \leq 40$:
$\varepsilon_{sw}=-9,18+1,5546 \cdot I_p+0,08424 \cdot 0,3 \cdot H-0,1 \cdot w-0,0432 \cdot I_p \cdot w-0,01215 \cdot 0,3 \cdot H$ [18]
$\varepsilon_{sw}=0,00001114 \cdot A_c^{2,559} \cdot C^{3,44}$ [19]
$\varepsilon_{sw}=-121,807+(12,1696 \cdot MBV)+[27,6579 \cdot \log_{10}(\psi)]$ [20]
$\varepsilon_{sw}=-57,965+37,076 p_d+0,524 MBV+\varepsilon$ [21]
$MFSI=1,84 \cdot e^{0,004 SSA}$ [22]
$\varepsilon_{sw}=24,5 \cdot (P)^{-0,26} \cdot (I_p \cdot C)^{1,26} \cdot [F_i-7,1 \cdot (P)^{0,22} \cdot (I_p \cdot C)^{0,78}]$ [23]
$\varepsilon_{sw}=-31,321+0,592 \cdot C+0,717 \cdot I_p-0,807 \cdot CEC-0,891 \cdot w+2,668 \cdot p_d$
$\varepsilon_{sw}=-9,567+0,606 \cdot C+0,636 \cdot I_p-0,792 \cdot w-0,487 \cdot p_d+6,289 \cdot W_L$
$\varepsilon_{sw}=-19,856+0,595 \cdot C+0,686 \cdot I_p-0,769 \cdot CEC-1,068 \cdot w+2,729 \cdot p_d$ [24]
$\varepsilon_{sw}=25,202+0,643 \cdot W_L-2,089 \cdot w$
$\varepsilon_{sw}=29,692+0,914 \cdot I_p-2,089 \cdot w$ [25]
$\varepsilon_{sw}=-432,06+7,73 \cdot C+0,12 \cdot CEC+0,46 \cdot I_p+4,30 \cdot p_d-1,18 \cdot w$ [26]
$\text{Log} \varepsilon_{sw}=0,0562 \cdot p_d+0,033 \cdot W_L-6,8$ [27]
$\varepsilon_{sw}=0,2558 \cdot e^{0,003 I_p}$ [28]

где ε_{sw} – набухание [%]; I_p – число пластичности [%]; W_L – влажность на границе текучести [%]; w – естественная влажность [%]; p_d – плотность скелета [г/см³]; C – содержание глины [%]; H – глубина залегания набухающего грунта [м]; α – модифицированная удельная влагоемкость; CEC – емкость поглощения [мг-экв/100 г]; ψ – водоудерживающая способность [кПа]; A_c – показатель коллоидной активности; ε_{sl} – усадка [%]; P – внешнее давление [кПа]; F_i – фактор начального состояния [1]; MBV – абсорбционная ёмкость по методу метиленового синего [г/100 г]; ε – средненулевое значение случайной ошибки Гаусса; $MFSI$ – модифицированный показатель свободного набухания.

where ε_{sw} – swelling [%]; I_p – plasticity index [%]; W_L – liquid limit [%]; w – water content [%]; p_d – dry soil density [g/cm³]; C – clay content [%]; H – depth of cover [m]; α – modified specific moisture capacity; CEC – cation exchange capacity [mg-equiv/100 g]; ψ – soil suction [kPa]; A_c – colloid activity; ε_{sl} – shrinkage [%]; P – swelling pressure [kPa]; F_i – initial state factor [1]; MBV – methylene blue value [g/100 g]; ε – mean-zero Gaussian random error term; $MFSI$ – modified free swell index.

Выявление корреляционных зависимостей между основными свойствами грунтов является важной задачей, поскольку в ряде случаев довольно сложно измерить необходимый параметр напрямую [11]. Определение набухания глинистых грунтов требует значительных затрат времени и денежных средств, а также предполагает разрушение образца породы во время испытания. Наличие прогностической модели для оценки корреляции набухания с физическими характеристиками (естественная влажность, плотность, пористость, число пластичности, влажность на границе текучести, влажность на границе раскатывания) значительно снизит затрачиваемые денежные и временные ресурсы на предварительной стадии проектирования.

На сегодняшний день проведены многочисленные исследования и анализ факторов, которые влияют на набухание грунтов. Обобщенные результаты исследований по корреляции выбранных параметров представлены в табл. 1.

До настоящего времени многие исследователи пытались разработать практические быстрые решения для прогнозирования трудно определяемых параметров (набухание, модуль деформации) по корреляции с легко определяемыми параметрами грунта. При этом использовались методы искусственного интеллекта, такие как множественный регрессионный анализ (MRA), искусственные нейронные сети (ANN) и генетическое программирование (GP) [29, 30].

Данное исследование посвящено определению взаимосвязи относительного набухания глин и их физических характеристик с применением методов машинного обучения.

Методы

В результате проведения инженерно-геологических изысканий в г. Караганда были отобраны и исследованы в лаборатории 103 пробы глин и получены значения следующих характеристик: естественная влажность (W), влажность на границе текучести (W_L), влажность на границе раскатывания (W_p), число пластичности (I_p), показатель текучести (I_L), плотность частиц грунта (p_s), плотность грунта (p), плотность скелета (p_d), плотность во взвешенном состоянии ($p_{вз}$), пористость (e), полная влагоемкость (W_n), степень влажности (S_r), относительное набухание (ε_{sw}).

Испытания в лаборатории для определения физических характеристик грунта и относительного набухания проводились согласно стандартам, применяемым на территории Республики Казахстан. Участки работ, где были проведены инженерно-геологические исследования в орографическом отношении, лежат в области водораздельного пространства между реками Нура и Шерубайнура. В целом рельеф представляет собой волнистую равнину, осложненную мелкосопочником. Глины, вскрытые на исследуемых участках, относятся к неогеновому и четвертичному периодам. Нижнечетвертичные отложения представлены глинистой толщей зеленовато-серых, темно-серых тонов с прослоями и линзами галечников, песков и супесей. Толща неогеновых осадков залегает на всей

территории Центрального Казахстанского мелкосопочника. Здесь широко развиты зеленые, зеленовато-серые монтмориллонитовые глины с марганцовистыми «картинками», местами с гипсом и линзами мергеля, которые относятся к аральской свите нижне-среднемиоценового возраста.

Для создания прогностической модели набухания глин применялись следующие методы машинного обучения: Random Forest, Multilinear regression, Support vector machines. Входными данными послужили следующие параметры:

- физические характеристики и гранулометрический состав глин, полученные посредством лабораторных испытаний, которые выражают их физическое состояние в условиях естественного залегания. Гранулометрический состав отражает количество пылеватых и песчаных частиц, наличие грубообломочного материала. Чем больше пелитового материала содержит глина, тем больше площадь ее удельной поверхности и как следствие повышенная способность к поглощению воды;
- цвет глин, включения марганца и гипса (отражают минералогический состав и возраст пород). Четвертичные отложения представлены серыми глинами озерного генезиса, а неогеновые – зелеными, зелено-серыми глинами монтмориллонитового состава с включением марганцовистых картинок и друз гипса;
- уровень грунтовых вод и глубина отбора проб. Показывает на какой глубине по отношению к водоносному горизонту в естественном состоянии залегает глина.

Физико-механические свойства глин имеют следующие показатели: естественная влажность (w) изменяется от 16 до 34 % при среднем значении 24 %; влажность на границе текучести (W_L) изменяется от 23 до 60 % при среднем значении 44 %; влажность на границе раскатывания (W_p) изменяется от 13 до 36 % при среднем значении 21 %; число пластичности (I_p) изменяется от 17 до 37 % при среднем значении 23 %. По данным значений показателя текучести (I_L) в разрезе присутствуют твердые, полутвердые, тугопластичные и мягкопластичные глины. Плотность глин (ρ) изменяется от 1,64 до 2,16 г/см³ при среднем значении 1,98 г/см³; плотность частиц (ρ_s) изменяется от 2,57 до 2,79 г/см³ при среднем значении 2,71 г/см³; плотность сухого грунта (ρ_d) изменяется от 1,37 до 1,82 г/см³ при среднем значении 1,60 г/см³; плотность во взвешенном состоянии ($\rho_{вз}$) изменяется от 1,37 до 1,82 г/см³ при среднем значении 0,98 г/см³; пористость (e) изменяется от 0,47 до 0,97 д. ед. при среднем значении 0,70 д. ед.; полная влагоемкость (W_n) изменяется от 0,17 до 0,36 д. ед. при среднем значении 0,26 д. ед.; степень влажности (S_r) изменяется от 0,50 до 1,00 д. ед. при среднем значении 0,92 д. ед. Гранулометрический состав глин изучаемого района характеризуется преобладанием фракций меньше 0,005 мм (до 80 %). Фракции крупностью более 10 мм не превышают 20 %, крупностью от 2 до 10 мм – 16 %.

В качестве инструмента для создания моделей был использован высокоуровневый язык программирова-

ния «Python» посредством дистрибутива «Anaconda». Отобранные свойства грунтов являлись входными данными для создания прогностической модели относительного набухания. При этом 80 % данных использовались для обучения модели, а 20 % использовались для валидации построенной модели, согласно теореме Парето. С целью оценки прогностической эффективности моделей применялся метод перекрестной проверки. Такой подход обеспечивает большую надежность и устойчивость для оценки прогностической способности каждой модели. Адекватность регрессионных моделей оценивалась показателем «Mean Squared Error (MSE)». Показатель MSE измеряет среднеквадратичное отклонение между прогнозируемыми и истинными значениями. И чем меньшее значение он имеет, тем точнее будет прогностическая модель. Для оптимизации гиперпараметров (параметры модели, которые задаются исследователем) модели в данном исследовании применялся метод Random search, который оптимизирует выбор гиперпараметров путем перекрестного поиска. В методе Random Forest для настройки модели использовались следующие параметры: bootstrap, max depth, max features, n-estimators, min samples split. В методе Multilinear regression – fit intercept, normalize. В методе Support vector machines – epsilon, C.

Результаты

База данных лабораторных исследований состоит из 103 проб глин и была составлена в результате проведения инженерно-геологических изысканий в г. Караганда, Казахстан. При помощи метода Random search для трех применяемых прогностических моделей были выбраны значения гиперпараметров и параметр MSE, которые представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наибольший показатель MSE имеет модель, построенная методом Multilinear regression (157,47) что говорит об отсутствии какой-либо зависимости между исследуемыми параметрами. Наименьшим показателем MSE обладает метод Random forest (27,73). Показатель MSE модели, построенной методом Support vector machines, занимает промежуточное положение и составляет 40,47.

На рис. 1 представлены результаты прогнозирования набухания методом Random Forest. Синим цветом обозначены измеренные значения, которые были получены посредством лабораторных испытаний, красным цветом – прогнозируемые значения, полученные в результате построения прогностической модели. Для построения диаграммы было использовано 21 значение относительного набухания глинистых пород (20 % данных использованы для валидации), которые были получены в результате построения модели Random Forest.

На диаграмме рассеяния (рис. 2) представлена корреляция между прогнозируемыми и измеренными значениями относительного набухания модели Random Forest. Коэффициент детерминации (R^2) составил 0,51. Коэффициент корреляции (R) – 0,71. Это говорит о том, что связь между переменными (набуханием и физическими характеристиками) является средней.

Таблица 2. Значения гиперпараметров моделей и параметра MSE

Table 2. Model hyperparameter and MSE parameter values

Модель Model	Гиперпараметры Hyperparameter	Значение Value	Среднеквадратическая ошибка Mean Squared Error
Случайный лес Random Forest	количество выборок n_estimators	100	27,73
	минимальное количество выборок min_samples_split	10	
	максимальное количество функций max_features	auto	
	максимальная глубина max_depth	40	
	бутстрап Bootstrap	true	
Множественная линейная регрессия Multilinear regression	фит интерсепт fit_intercept	true	157,47
	нормализация normalize	true	
Метод опорных векторов Support vector machines	эпсилон epsilon	0,1	40,47
	C	3,0	

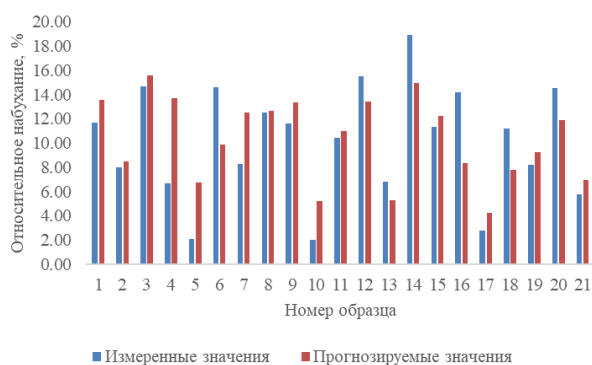


Рис. 1. Гистограмма сравнения измеренных и прогнозируемых значений набухания

Fig. 1. Bar graph comparing measured and predicted swelling values

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Agency for strategic planning and reforms of the Republic of Kazakhstan Bureau of National statistics // 2019. URL: <https://stat.gov.kz/> (дата обращения 17.11.2020).
- Zhang T.W., Wang S.J. Explanation of the influence of sodium chloride solution on volume deformation and permeability of normally consolidated clays // Materials. – 2019. – V. 12. – P. 1–13.
- Selvakumar S., Soundara B. Swelling behaviour of expansive soils with recycled geofoam granules column inclusion // Geotextiles and Geomembranes. – 2019. – V. 47. – P. 1–11.
- Julina M., Thyagaraj T. Combined effects of wet-dry cycles and interacting fluid on desiccation cracks and hydraulic conductivity of compacted clay // Engineering Geology. – 2020. – V. 267. – P. 1–15.
- Khan M.A., Wang J.X., Patterson W.B. A study of the swell-shrink behavior of expansive Moreland clay // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2019. – V. 13. – P. 205–217.
- Sabtan A.A. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia // Journal of Asian Earth Sciences. – 2005. – V. 25. – P. 747–757.

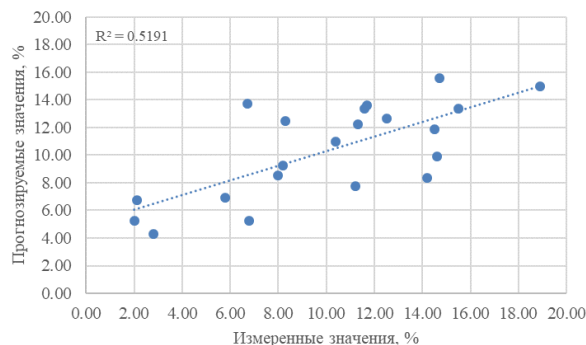


Рис. 2. Диаграмма рассеяния

Fig. 2. Scatter plot

Выводы

- Использовались методы машинного обучения для моделирования, нацеленного на предложение нового подхода к прогнозированию относительного набухания без проведения дополнительных лабораторных исследований. Относительное набухание (ϵ_{sw}) глин оценивалось на основе физических характеристик, таких как W , W_L , W_p , I_p , I_L , p_s , p , $p_{ск}$, $p_{вз}$, e , $W_{п}$, S_r , гранулометрического состава, цвета, включений марганца и гипса, залегания глин относительно водоносного горизонта. Исследования проводились с использованием 103 образцов, полученных в результате инженерно-геологических изысканий в г. Караганда, Казахстан.
- Сравнение моделей проводилось по значениям показателя MSE. Для прогнозирования относительного набухания был выбран метод Random Forest. Модель, построенная с помощью метода Random Forest, наиболее эффективна для моделирования относительного набухания по сравнению с моделями, построенными методами Multilinear regression и Support vector machines.
- Построенную модель можно использовать при производстве инженерно-геологических изысканий для разработки предпроектной документации.
- Для повышения надежности рассматриваемой модели необходимо увеличить число исследуемых образцов глин.
- Giles D.P., Griffiths J.S. Geological hazards in the UK: their occurrence, monitoring and mitigation: engineering group working party report. – England: Geological Soc Publishing House, 2020. – 490 p.
- Swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling in complex geological settings and impact of hydraulic measures assessed by 3D groundwater modeling / C. Butscher, S. Scheidler, H. Farhadian, H. Dresmann, P. Huggenberger // Engineering Geology. – 2017. – V. 221. – P. 143–153.
- Акт расследования причин обрушения дома № 7 в микрорайоне Бесоба // 2012. URL: http://ekaraganda.kz/?mod=news_read&id=5678 (дата обращения 15.10.2020).
- Prediction of swelling pressure of soil using artificial intelligence techniques // S.K. Das, P. Samui, A.K. Sabat, T.G. Sitharam // Environmental Earth Sciences. – 2010. – V. 61. – P. 393–403.
- Yilmaz I., Yuksek G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2009. – V. 46. – P. 803–810.
- Seed H.B., Woodward J., Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1962. – V. 88. – P. 53–87.

13. Ranganatham B.V., Satyanarayana B. A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays // Proc. of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Montreal, 1965. – V. 1. – P. 92–96.
14. Vijayvergiya V.N., Ghazzally O.I. Prediction of swelling potential of natural clays // Proceedings of the Third International Conference on Expansive Soils. – Haifa, July 30 – August 1, 1973. – V. 44. – P. 227–234.
15. A semi-empirical approach-based model for swell characterization of expansive clays / A. Pedarla, A.J. Puppala, U.D. Patil, L.R. Hoyos, A.H. Pino // Geotechnical and Geological Engineering. – 2019. – V. 37. – P. 5371–5381.
16. McCormack D.E., Wilding L.P. Soil properties influencing swelling in canfield and Geeburg soils // Soil Science Society of America Journal. – 1975. – V. 39. – P. 496–502.
17. O'Neil M.W., Ghazzally O.I. Swell potential related to building performance // Journal of the Geotechnical Engineering Division. – 1977. – V. 103. – P. 1363–1379.
18. Johnson L.P., Snethen D.R. Prediction of potential heave of swelling soil // Geotechnical Testing Journal. – 1978. – V. 1. – P. 117–124.
19. Bandyopadhyay S.S. Prediction of swelling potential for natural soils // Journal of Geotechnical Engineering Division. – 1981. – V. 107. – P. 658–691.
20. Chao K.C., Nelson J.D. Validation of foundation design method on expansive soils // Geotechnical engineering. – 2019. – V. 50. – P. 103–111.
21. Cokca E. Relationship between methylene blue value, initial soil suction and swell percent of expansive soils // Turkish Journal of Engineering and Environmental Science. – 2002. – V. 26. – P. 521–529.
22. Prediction of geotechnical properties of clayey soils stabilised with lime using artificial neural networks (ANNs) / I.T. Bahmed, K. Harichane, M. Ghrici, B. Boukhatef, R. Rebouh, H. Gadouri // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2019. – V. 16. – P. 702–711.
23. Zumrawi M. Prediction of swelling characteristics of expansive soils // Sudan Engineering Society Journal. – 2012. – V. 13. – P. 191–203.
24. Erzin Y., Gunes N. The unique relationship between swell percent and swell pressure of compacted clays // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2013. – V. 72. – P. 71–80.
25. Gawriuczenkow I., Wójcik E. Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index // Geology, Geophysics & Environment. – 2018. – V. 44. – P. 219–229.
26. Chen F.H. Foundations on expansive soils. – Amsterdam: Elsevier, 1975. – 295 p.
27. Ameratunga J., Sivakugan N., Das B.M. Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering. – India: Springer, 2016. – 228 p.
28. Spatial variation and correlation between undrained shear strength and plasticity index / X. Kang, S. Onyejekwe, L. Ge, R. Stephenson // Geo-Frontiers 2011: advances in geotechnical engineering. – Texas: American Society of Civil Engineers, 2011. – P. 2631–2636.
29. Erzin Y., Gunes N. The prediction of swell percent and swell pressure by using neural networks // Mathematical and Computational Applications. – 2013. – V. 16 – P. 425–436.
30. Vijayvergiya V.N., Sulvan R.A. Simple technique for identifying heave potential // Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction. – Denver, 1972. – V. 1. – P. 149–154.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Вдовкина Д.И., докторант кафедры геологии и разведки МПИ, Карагандинский технический университет.

Кошляков А.Е., доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии и гидрогеологии, НИИ «Институт геологии», Киевский национальный университет им. Т. Шевченко.

Пономарева М.В., кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых, Карагандинский технический университет.

Пономарева Е.В., доктор PhD, старший преподаватель кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых, Карагандинский технический университет.

UDC 552.52

ESTIMATION OF CLAY SWELLING PROPERTIES IN KARAGANDA TERRITORY USING MACHINE LEARNING METHODS

Darya I. Vdovkina¹,
daryavdovkina@gmail.com

Oleksii Y. Koshliakov²,
kosh57@ukr.net

Marina V. Ponomareva¹,
mv_ponomareva18@mail.ru

Ekaterina V. Ponomareva¹,
evmussina1992@gmail.com

¹ Karaganda Technical University,
56/1, Nursultan Nazarbayev avenue, Karaganda, 100012, Kazakhstan.

² Taras Shevchenko National University,
90, Vasylykivska street, 03022, Kyiv, Ukraine.

The relevance of the study is caused by the need to identify the dependence of the clays swelling on their physical characteristics in order to reduce time and money resources during geotechnical surveys. The active development of the construction industry leads to the development of territories composed of soils, which, as a result of moisture, increase in volume – swell.

The main aim of the study is to establish the relationship between the relative swelling of clay rocks and their physical characteristics, the determination of which requires minimal resources using machine learning methods.

Objects: Quaternary and Neogene clays of Karaganda, which compose the geological section of the territories used for the construction of buildings and structures.

Methods: creation of laboratory database (physical and compression characteristics, particle size distribution) and field (description of soils: color, presence of inclusions, determination of groundwater level, sampling intervals) studies of clays in excel; application of the high-level programming language «Python» to develop mathematical models using the «Anaconda» distribution kit; the Pareto theorem application for training and validation of the resulting model; use of the «Mean Squared Error» indicator to assess the adequacy of the developed models.

Results. Three predictive models of the relative clay swelling were developed. The laboratory and geological parameters of 103 clay samples taken as a result of geotechnical surveys in Karaganda, Kazakhstan, were the input data. The following machine learning algorithms were used: Random Forest, Multilinear regression, Support vector machines. According to the «Mean Squared Error» criterion, the Random Forest model was chosen to develop a relative swelling model.

Key words:

Clay rocks, clays, swelling, Random Forest model, Quaternary deposits, Neogene deposits.

REFERENCES

1. Agency for strategic planning and reforms of the Republic of Kazakhstan Bureau of National statistics. Available at: <https://stat.gov.kz/> (accessed 17 November 2020).
2. Zhang T.W., Wang S.J. Explanation of the Influence of Sodium Chloride Solution on Volume Deformation and Permeability of Normally Consolidated Clays. *Materials*, 2019, vol. 12, pp. 1–13.
3. Selvakumar S., Soundara B. Swelling behaviour of expansive soils with recycled geofoam granules column inclusion. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, vol. 47, pp. 1–11.
4. Julina M., Thyagaraj T. Combined effects of wet-dry cycles and interacting fluid on desiccation cracks and hydraulic conductivity of compacted clay. *Engineering Geology*, 2020, vol. 267, pp. 1–15.
5. Khan M.A., Wang J.X., Patterson W.B. A study of the swell-shrink behavior of expansive Moreland clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, vol. 13, pp. 205–217.
6. Sabtan A.A. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, vol. 25, pp. 747–757.
7. Giles D.P., Griffiths J.S. *Geological hazards in the UK: their occurrence, monitoring and mitigation: engineering group working party report*. England, Geological Soc Publishing House, 2020. 490 p.
8. Butscher C., Scheidler S., Farhadian H., Dresmann H., Huggenberger P. Swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling in complex geological settings and impact of hydraulic measures assessed by 3D groundwater modeling. *Engineering Geology*, 2017, vol. 221, pp. 143–153.
9. *Akt rassledovaniya prichin obrusheniya doma № 7 v mikroraiione Besoba* [The act of investigation of the causes for house no. 7 collapse in the Besoba microdistrict]. Available at: http://ekaraganda.kz/?mod=news_read&id=5678 (accessed 15 October 2020).
10. Das S.K., Samui P., Sabat A.K., Sitharam T.G. Prediction of swelling pressure of soil using artificial intelligence techniques. *Environmental Earth Sciences*, 2010, vol. 61, pp. 393–403.
11. Yilmaz I., Yuksek G. Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, vol. 46, pp. 803–810.
12. Seed H.B., Woodward J., Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1962, vol. 88, pp. 53–87.
13. Ranganatham B.V., Satyanarayana B. A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Montreal, 1965. pp. 92–96.
14. Vijayvergiya V.N., Ghazzally O.I. Prediction of swelling potential of natural clays. *Proceedings of the Third International Conference on Expansive Soils*. Israel, Haifa, July 30 – August 1, 1973. pp. 227–234.

15. Pedarla A., Puppala A.J., Patil U.D., Hoyos L.R., Pino A.H. A semi-empirical approach-based model for swell characterization of expansive clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, vol. 37, pp. 5371–5381.
16. McCormack D.E., Wilding L.P. Soil properties influencing swelling in canfield and Geeburg soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, vol. 39, pp. 496–502.
17. O'Neil M.W., Ghazzally O.I. Swell potential related to building performance. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, vol. 103, pp. 1363–1379.
18. Johnson L.P., Snethen D.R. Prediction of potential heave of swelling soil. *Geotechnical Testing Journal*, 1978, vol. 1, pp. 117–124.
19. Bandyopadhyay S.S. Prediction of swelling potential for natural soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1981, vol. 107, pp. 658–691.
20. Chao K.C., Nelson J.D. Validation of foundation design method on expansive soils. *Geotechnical engineering*, 2019, vol. 50, pp. 103–111.
21. Cokca E. Relationship between methylene blue value, initial soil suction and swell percent of expansive soils. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 2002, vol. 26, pp. 521–529.
22. Bahmed I.T., Harichane K., Ghrici M., Boukhatem B., Rebouh R., Gadouri H. Prediction of geotechnical properties of clayey soils stabilised with lime using artificial neural networks (ANNs), *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, vol. 16, pp. 702–711.
23. Zumrawi M. Prediction of swelling characteristics of expansive soils. *Sudan Engineering Society Journal*, 2012, vol. 58, pp. 55–62.
24. Erzin Y., Gunes N. The unique relationship between swell percent and swell pressure of compacted clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2013, vol. 72, pp. 71–80.
25. Gawriuczenkow I., Wójcik E. Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index. *Geology, Geophysics & Environment*, 2018, vol. 44, pp. 219–229.
26. Chen F.H. *Foundations on expansive soils*. Amsterdam, Elsevier, 1975. 295 p.
27. Ameratunga J., Sivakugan N., Das B.M. *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. India, Springer, 2016. 228 p.
28. Kang X., Onyejekwe S., Ge L., Stephenson R. Spatial variation and correlation between undrained shear strength and plasticity index. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Texas, American Society of Civil Engineers, 2011. pp. 2631–2636.
29. Erzin Y., Gunes N. The prediction of swell percent and swell pressure by using neural networks. *Mathematical and Computational Applications*, 2013, vol. 16, pp. 425–436.
30. Vijayvergiya V.N., Sulvian R.A. Simple technique for identifying heave potential. *Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction*. Denver, 1972, vol. 1, pp. 149–154.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Darya I. Vdovkina, doctoral student, Karaganda technical university.

Oleksii Y. Koshliakov, Dr. Sc., professor, Taras Shevchenko National University.

Marina V. Ponomareva, Cand. Sc., associate professor, Karaganda Technical University.

Ekaterina V. Ponomareva, Dr. Sc., senior lecturer, Karaganda Technical University.