

УДК 624.131.1. (571.5)

## РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ПЛАСТИЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ И ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ПО ПРЕДЕЛУ ТЕКУЧЕСТИ: ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

© Т.Г. Рященко<sup>1</sup>, С.А. Тирских<sup>2</sup>, Ю.В. Вашестюк<sup>3</sup>, И.Л. Куклина<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

<sup>1,2,3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>4</sup>Восточно-Сибирский трест инженерно-строительных изысканий, 664007, Россия, г. Иркутск, ул. Декабрьских событий, 57.

Рассмотрены результаты расчета числа пластичности грунтов Монголо-Сибирского региона по трем прогнозным формулам, полученным Б.Ф. Галаем для Северного Кавказа и других районов Европейской части СССР и сотрудниками Восточно-Сибирского треста инженерно-строительных изысканий (г. Иркутск). Выполнена оценка степени совпадения экспериментальных и расчетных данных для глинистых и лессовых грунтов исследованной территории, использована программа кластерного анализа R-типа; даны некоторые рекомендации практического характера.

*Ключевые слова:* число пластичности; глинистые и лессовые грунты; формулы; расчет; кластерный анализ; сопоставление; рекомендации.

## CALCULATION FORMULAS DETERMINING PLASTICITY INDEX OF CLAYEY AND LOESS SOILS BY THE YIELD POINT: FEASIBILITY OF APPLICATION

T.G. Ryashchenko, S.A. Tirskikh, I.V. Vashestyuk, I.L. Kuklina

Institute of the Earth Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

East Siberian trust of construction engineering investigations, 57 Dekabrskikh Sobytii, Irkutsk, 664007, Russia.

The calculation results of Mongolian-Siberian region soil plasticity are examined by three predictive formulas derived by B.F. Galai for the North Caucasus and other regions of the European part of the USSR and by the staff of the East Siberian trust of construction engineering investigations (Irkutsk). The degree of experimental and calculated data coincidence for clayey and loess soils for the investigated areas is assessed with the application of the R-type cluster analysis program. Some practical recommendations are given.

*Keywords:* plasticity index; clayey and loess soils; formulas; calculation; cluster analysis; correlation; recommendations.

---

<sup>1</sup>Рященко Тамара Гурьевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИЗК СО РАН, профессор кафедры прикладной геологии Института недропользования ИРННТУ, тел.: (3952) 426133, e-mail: ryashenk@crust.irk.ru

Ryashchenko Tamara, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Leading Researcher at the Institute of the Earth's Crust SB RAS, Professor of the Department of Applied Geology of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, tel.: (3952) 426133, e-mail: ryashenk@crust.irk.ru

<sup>2</sup>Тирских Светлана Андреевна, аспирант ИЗК СО РАН, инженер Центра геоэкологических исследований ИРННТУ, тел.: (3952) 405184, e-mail: v19@istu.edu

Tirskikh Svetlana, Postgraduate at the Institute of the Earth's Crust SB RAS, Engineer of the Centre of Geoecological Researches of Irkutsk National Research Technical University, tel: (3952) 405184, e-mail: v19@istu.edu

<sup>3</sup>Вашестюк Юлия Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры прикладной геологии, тел.: (3952) 405349.

Vashestyuk Iulia, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Lecturer of the Department of Applied Geology, tel.: (3952) 405349.

<sup>4</sup>Куклина Ирина Леонидовна, зав. лабораторией грунтоведения, тел. (3952) 292237.

Kuklina Irina, Head of the Laboratory of Soil Science, tel.: (3952) 292237.

**Введение.** Определение пластичности для глинистых и лессовых грунтов является обязательным условием при их инженерно-геологической оценке. Согласно официальной классификации [1, 2], виды этих грунтов устанавливаются по числу пластичности  $I_p$ , которое представляет собой разность между пределами текучести  $W_m$  и пластичности  $W_p$ . Кроме того, по значениям природной влажности, предела и числа пластичности рассчитывается показатель текучести  $I_L$ , который характеризует консистенцию образца.

Если конусный метод определения  $W_m$  хорошо обоснован исследованиями А.М. Васильевой [4], П.О. Бойченко [3], позднее В.Д. Ломтадзе [9] и другими, то методика оценки  $W_p$  путем раскатывания в шнур считается многими исследователями субъективной. Например, расхождение значений  $I_p$ , определенных в семи лабораториях с помощью конуса и раскатывания, достигает 5,3% (относительное – 29,7%) [7]. В настоящее время также наблюдаются различия значений  $W_p$ , которые устанавливаются по одним и тем же образцам в грунтовых лабораториях Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) и Центра геоэкологических исследований Иркутского национального исследовательского технического университета (ЦГЭИ ИРНТУ).

В 70-х годах прошлого века появилась статья Б.Ф. Галяя, в которой на основе огромного фактического материала (около 20 тыс. образцов лессовых пород из районов Ставрополя и Ростова-на-Дону) были представлены и рекомендованы уравнения регрессии, позволившие вывести общую формулу зависимости числа пластичности от предела текучести [5] (расчеты в процентах):

$$I_p = 0,75W_m - 11. \quad (1)$$

В этой же работе указано, что коэффициенты корреляции между  $W_m$  и  $W_p$  изменяются от 0,465 до 0,850, а между  $W_p$  и  $I_p$  – находятся в пределах 0,2–0,5; снижение коэффициента во втором случае объясняется большими ошибками при определении  $W_p$ . Главный вывод автора:

предложенную формулу можно рекомендовать для расчета числа пластичности без использования  $W_p$  – весьма субъективного параметра. Следует заметить, что в конце публикации имелось пожелание редакции уточнить корреляционную зависимость числа пластичности от предела текучести на большем числе опытных данных, а также проверить ее для грунтов различного происхождения.

В следующей статье была представлена несколько иная формула (расчеты в процентах):

$$I_p = 0,8W_m - 14; \quad (2)$$

генеральная совокупность включала 75 образцов глин различного возраста и генезиса, 62 образца представляли морские илы и покровные отложения, 51 – лессовые грунты Северного Кавказа, 250 – моренные и лессовые отложения [6]. В дальнейшем «работа» этих расчетных формул, вероятнее всего, не проверялась на примере других информационных банков.

Известно, что в 80-х годах прошлого века сотрудниками Восточно-Сибирского треста инженерно-строительных изысканий (ВостСибТИСИЗ) в г. Иркутске также была разработана прогнозная формула для расчета числа пластичности по значению предела текучести, но она в тот период применялась только для элювиальных глинистых отложений и в настоящее время почти не используется. Эта формула имеет следующий вид (расчеты ведутся в долях единицы, затем переводятся в проценты):

$$I_p = 0,599W_m - 0,079. \quad (3)$$

Авторы представляемой статьи поставили перед собой задачу оценить возможности применения трех указанных «забытых» формул на примере глинистых и лессовых грунтов различных геолого-генетических комплексов Монголо-Сибирского региона (юг Восточной Сибири и Западная Монголия). Для этой цели проведены расчеты числа пластичности по формулам (1)–(3) и выполнена оценка степени совпадения экспериментальных и расчетных данных, но не по абсолютной цифре, а по названию грунта

согласно стандартной классификации: супеси ( $I_p < 7$ ), суглинки ( $I_p = 7-17$ ), глины ( $I_p > 17$ ). При обработке материалов традиционно использована программа кластерного анализа.

**Объекты исследований и методика.** В качестве первого объекта использована группировка (выборка) из 125 образцов, представленных лессовыми и глинистыми грунтами различных геолого-генетических комплексов четвертичного возраста (материалы ИЗК СО РАН). Она включала лессовидные отложения (dQ33 + aQ3), вскрытые инженерно-геологическими скважинами на строительной площадке «Маршал» в г. Иркутске (скв. 1416а, 250а, 1437, 260 – 50 образцов) и г. Алтае в Монголии (dpQ) (скв. 2-АТ – 16 образцов); глинистые (элювий протерозойских сланцев) и лессовидные грунты (dQ4) из шурфов и неглубоких скважин в районе пос. Могойтуй в Забайкалье (29 образцов); глинистые отложения (dpQ) левобережья р. Белой в районе д. Мальта (скв. 1ГС – 21 образец); глинистые грунты (pdQ + элювий верхоленской свиты) из расчистки на левобережье Осинского залива Братского водохранилища (9 образцов).

Для каждого из 125 образцов проводились экспериментальные данные о пределах и числе пластичности (%) и результаты расчета по формулам (1) –  $I_{p1}$ , (2) –  $I_{p2}$ , (3) –  $I_{p3}$ .

В качестве примера представлены результаты для восьми образцов (табл. 1).

Вторая выборка включала 148 образцов глинистых и лессовых грунтов, отобранных из скважин и шурфов, пройденных в пределах юга Иркутской области (Иркутск, Мегет, Свирск, Черемхово и др.) (материалы ЦГЭИ ИРНТУ). Для каждого объекта также представлены экспериментальные данные о пределах и числе пластичности и результаты расчета по формулам (1) –  $I_{p1}$ , (2) –  $I_{p2}$ , (3) –  $I_{p3}$ . В качестве примера приведены результаты для восьми образцов (табл. 2).

Для первой и второй группировок проведена статистическая обработка данных и получены основные статистические параметры: среднее, минимальное и максимальное значения экспериментальных и расчетных значений пластичности, стандартное отклонение, коэффициент вариации, среднее отклонение, медиана и мода.

Для количественной оценки взаимосвязей между значениями числа пластичности, определенными экспериментально ( $I_p$ ) и по прогнозным уравнениям ( $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ,  $I_{p3}$ ), применялась программа «Кластер-анализ» R-типа [8, 10, 11].

**Результаты и их обсуждение.** Статистическая обработка. Полученная информация показала, что средние значения числа пластичности,

Таблица 1

**Экспериментальные ( $I_p$ ) и расчетные ( $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ,  $I_{p3}$ ) значения числа пластичности, % (данные из первой выборки)**

$W_m$	$W_p$	$I_p$	$I_{p1}$	$I_{p2}$	$I_{p3}$	Название грунта
34,8	23,1	11,7	15,1	13,8	12,9	суглинок
30,5	22,4	8,1	11,9	10,4	10,4	суглинок
22,5	18,2	4,3	5,9	4,0	5,6	супесь
49,3	25,4	23,9	26,0	25,4	21,6	глина
42,7	25,0	17,7	21,0	20,2	17,7	суглинок
46,6	38,1	8,5	24,0	23,3	20,0	несовпадение
31,6	27,8	3,8	12,7	11,3	11,0	несовпадение
27,8	21,5	6,3	9,9	8,2	8,8	несовпадение

Таблица 2

Экспериментальные ( $I_p$ ) и расчетные ( $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ,  $I_{p3}$ ) значения числа пластичности, % (данные из второй выборки)

$W_m$	$W_p$	$I_p$	$I_{p1}$	$I_{p2}$	$I_{p3}$	Название грунта
49,0	31,4	17,6	25,8	25,2	21,5	глина
57,2	35,1	22,1	31,9	31,8	26,4	глина
32,7	21,8	10,9	13,5	12,2	11,7	суглинок
29,6	20,2	9,4	11,2	9,7	9,8	суглинок
22,9	17,5	5,4	6,2	4,3	5,8	супесь
27,8	21,6	6,2	9,9	8,2	8,8	несовпадение
44,7	34,5	10,2	22,5	21,8	18,9	несовпадение
22,2	15,4	6,8	16,5	15,3	14,0	несовпадение

определенного экспериментально и по расчетным формулам, хорошо совпадают не только по признаку классифицирования грунтов, но и по абсолютным цифрам (табл. 3, 4).

Для общего числа исследованных образцов, представляющих первую и вторую группировки ( $n = 273$ ), экспериментальное число пластичности в среднем составляет 8,2% – рассчитаны по формулам – 11,6; 10,6; 10,5 (рис. 1).

Коэффициенты вариации для  $I_p$  достигают 49–55%, для  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ,  $I_{p3}$  увеличиваются до 87 (42–87%), что свидетельствует о широком диапазоне изменений показателя. Таким образом, экспериментальные и расчетные данные вполне сопоставимы, то есть все три расчетные формулы использовать можно, тем более что по средним значениям числа пластичности различия весьма незначительные.

Таблица 3

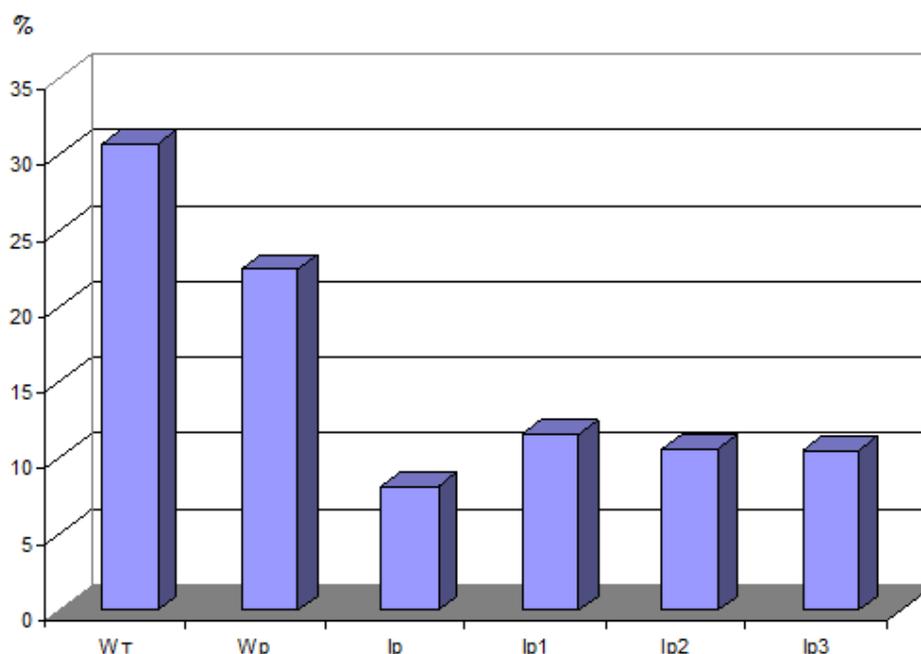
Результаты статистической обработки данных по экспериментальным и расчетным значениям числа пластичности лессовых и глинистых грунтов Монголо-Сибирского региона ( $n = 125$ )

Параметр	Показатель пластичности, %					
	$W_m$	$W_p$	$I_p$	$I_{p1}$	$I_{p2}$	$I_{p3}$
$X_{cp}$	31,2	23,6	7,6	11,5	10,9	10,8
$X_{min}$	18,3	15,2	1,6	2,7	0,6	3,1
$X_{max}$	54,9	42,1	23,9	30,2	29,9	25,0
$\sigma$	7,561	4,780	4,162	5,672	6,007	4,586
$V$ , %	24	20	55	50	55	42
$\theta$	5,629	3,401	3,044	4,225	4,435	3,411
$M_d$	29,8	23,2	6,5	11,4	9,8	10,0
$M_o$	27,4	21,8	7,8	11,4	9,8	10,0

Примечание. Здесь и в табл. 4 показатели пластичности, %:  $W_m$  – предел текучести,  $W_p$  – предел пластичности,  $I_p$  – число пластичности (экспериментальные данные);  $I_{p1}$  – расчетное значение числа пластичности по формуле (1);  $I_{p2}$  – расчетное значение числа пластичности по формуле (2);  $I_{p3}$  – расчетное значение числа пластичности по формуле (3). Параметры:  $X_{cp}$ ,  $X_{min}$ ,  $X_{max}$  – среднее, минимальное и максимальное значения показателя;  $\sigma$  – стандартное отклонение;  $V$  – коэффициент вариации;  $\theta$  – среднее отклонение;  $M_d$  – медиана;  $M_o$  – мода;  $n$  – число образцов.

**Результаты статистической обработки данных по экспериментальным  
и расчетным значениям числа пластичности лессовых и глинистых грунтов  
Иркутской области ( $n = 148$ )**

Параметр	Показатель пластичности, %					
	$W_m$	$W_p$	$I_p$	$I_{p1}$	$I_{p2}$	$I_{p3}$
$X_{cp}$	30,2	21,4	8,8	11,7	10,2	10,2
$X_{min}$	18,0	13,5	3,5	2,5	0,4	1,8
$X_{max}$	74,2	47,2	27,5	44,7	45,4	36,5
$\sigma$	11,120	7,275	4,318	8,340	8,896	6,683
$V, \%$	37	34	49	71	87	66
$\theta$	7,0	5,0	3,0	5,0	6,0	4,372
$M_d$	27,1	19,0	7,9	9,3	7,7	8,3
$M_o$	22,0	17,0	7,2	5,7	3,8	9,8



*Рис. 1. Пределы текучести ( $W_m$ ), пластичности ( $W_p$ ), число пластичности ( $I_p$ ) лессовых и глинистых грунтов по экспериментальным данным и значения числа пластичности, %, рассчитанные по формулам (1) –  $I_{p1}$ , (2) –  $I_{p2}$ , (3) –  $I_{p3}$  (график построен по средним значениям показателей для двух группировок образцов,  $n = 273$ )*

*Кластерный анализ R-типа.* На следующем этапе выполнена оценка взаимосвязей между экспериментальными ( $I_p$ ) и расчетными ( $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ,  $I_{p3}$ ) значениями числа пластичности глинистых и лессовых грунтов региона. В этом случае строится график-дендрограмма, характеризующий степень корреляционной зависимости между признаками и их группами: при коэффициенте корреляции более 0,7 (горизонтальная ось графика)

связи считаются существенными, 0,7–0,4 – заметными, менее 0,4 – незначительными.

Для первой группировки образцов ( $n = 125$ ) установлена идеальная взаимосвязь (коэффициент равен 1) между значениями числа пластичности, рассчитанными по всем трем формулам; степень корреляции экспериментальных данных ( $I_p$ ) с расчетными весьма существенна (коэффициент равен 0,82) (рис. 2).

Для второй группировки ( $n = 148$ ) установлены аналогичные взаимосвязи, при этом степень корреляции лабораторных данных ( $I_p$ ) с расчетными, полученными по трем формулам, возрастает до 0,87 (рис. 3).

Общая выборка образцов ( $n = 273$ ), на основе которой также была получена дендрограмма, представила те же зависимости между различными значениями числа пластичности глинистых и лессовых грунтов (рис. 4).

### Кластер R

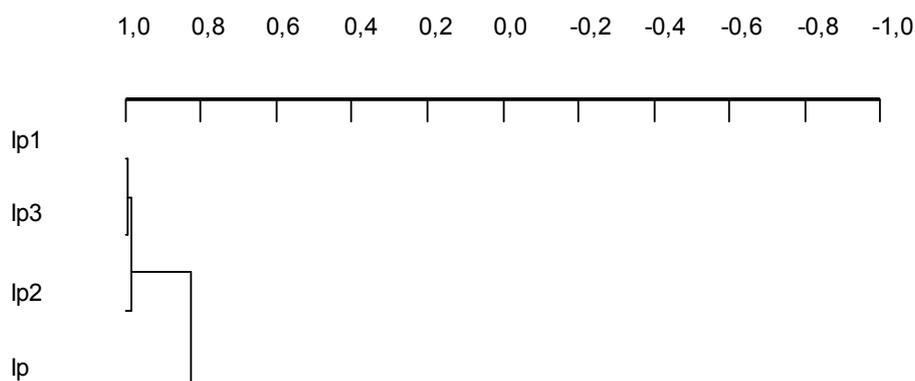


Рис. 2. Взаимосвязи расчетных и экспериментальных значений числа пластичности глинистых и лессовых грунтов Монголо-Сибирского региона (первая группировка образцов,  $n = 125$ )

### Кластер R

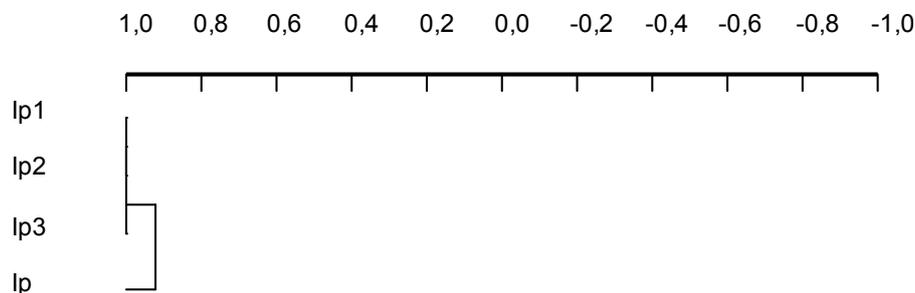


Рис. 3. Взаимосвязи расчетных и экспериментальных значений числа пластичности глинистых и лессовых грунтов Монголо-Сибирского региона (вторая группировка образцов,  $n = 148$ )

### Кластер R

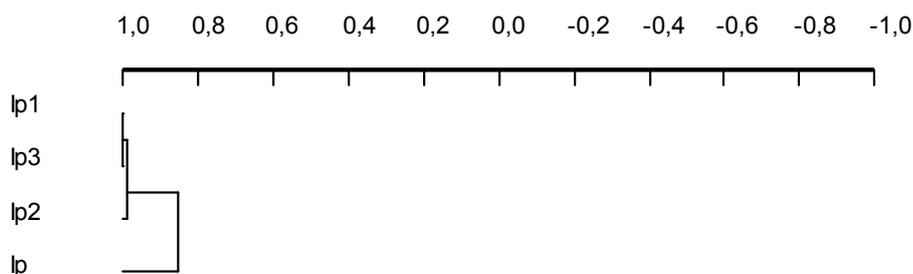


Рис. 4. Взаимосвязи расчетных и экспериментальных значений числа пластичности глинистых и лессовых грунтов Монголо-Сибирского региона (первая и вторая группировки образцов,  $n = 273$ )

Следовательно, установленные зависимости доказали возможность использования предложенных расчетных формул для получения показателя пластичности по пределу текучести, тем более что корреляция с экспериментальными данными находится на достаточно высоком уровне (0,82–0,87).

*Оценка степени совпадения экспериментальных и расчетных данных.* Оценка совпадения (несовпадения) проводилась, как указывалось выше, по названию грунта в соответствии с его стандартной классификацией: супеси ( $I_p < 7$ ), суглинки ( $I_p = 7-17$ ), глины ( $I_p > 17$ ). Отдельно рассмотрены первая ( $n = 125$ ) и вторая ( $n = 148$ ) группировки, затем общий информационный банк ( $n = 273$ ).

В первой группировке совпадение по формулам (1)–(3) зафиксировано для 55 образцов (44%), по формулам (1), (2) – 18 образцов (14%), общее число совпадений – 73 образца (58%).

Для второй группировки совпадение по формулам (1)–(3) зафиксировано для 95 образцов (64%), по формулам (2), (3) (редко по формулам (1), (2); (3); (1)) – 26 образцов, общее число совпадений – 121 образец (84%). Соответственно, в общей исследованной выборке ( $n = 273$ ) число совпадений установлено для 194 образцов, что составило 71%.

На основании изложенных материалов можно сделать следующие **выводы**:

1. На примере лессовых и глинистых грунтов Монголо-Сибирского региона впервые выполнена оценка степени совпадения экспериментальных и расчетных значений числа пластичности в результате применения прогнозных формул, предложенных Б.Ф. Галаем (формулы (1), (2)) и сотрудниками ВостСибТИСИЗа (формула (3)), при этом использованы материалы ИЗК СО РАН (первая выборка – 125 образцов) и ЦГЭИ ИРНТУ (вторая выборка – 148 образцов).

2. Результаты статистической обработки данных первой и второй группировок показали удовлетворительную сходимость средних значений числа пластичности ( $I_p, I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}$ ) при достаточном разнообразии этого показателя в рамках информационного банка (коэффициенты вариации находятся в пределах 42–87%).

3. Кластер-анализ R-типа подтвердил очень высокую степень совпадений расчетов по формулам (1)–(3) (коэффициент корреляции – 1) и существенную взаимосвязь экспериментальных и расчетных значений числа пластичности (коэффициент корреляции – 0,82–0,87).

4. Степень совпадения названия грунта по лабораторным данным и расчетным значениям числа пластичности, установленная для 273 объектов-образцов, оказалась равной 71%, следовательно, предложенные формулы можно рекомендовать для практического использования в регионе.

5. В качестве рекомендации экспериментальные определения числа пластичности глинистых и лессовых грунтов строительных площадок, где проводятся инженерно-геологические изыскания, предлагается сопровождать расчетами по прогнозным формулам (можно использовать любую из предложенных вариантов) для получения новой информации относительно степени совпадения прямых и расчетных данных; одновременно следует исследовать факторы пластичности, к числу которых относятся микроструктурные параметры грунта и состав глинистых минералов.

### Библиографический список

- ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1984. 23 с.
- ГОСТ 25100-2011. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2012. 58 с.

3. Бойченко П.О. К вопросу определения пределов пластичности грунтов методом конуса // Ученые записки ЛГУ. Геологические науки. 1956. № 7 (209).

4. Васильев А.М. Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов. М.: Госстройиздат, 1953. 216 с.

5. Галай Б.Ф. Использование границы текучести глинистых грунтов для характеристики их пластичности // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1974. № 4.

6. Галай Б.Ф. Корреляционные зависимости между показателями пластичности глинистых грунтов // Известия вузов. Геология и разведка. 1978. № 8. С. 100–103.

7. Горькова И.М. Структурные и деформационные особенности осадочных пород. М.: Наука, 1964. 128 с.

8. Данилов Б.С. Кластерный анализ в EXCEL // Строение литосферы и геодинамика: материалы научн. конф. Иркутск, 2001. С. 18–19.

9. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 327 с.

10. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.

11. Рященко Т.Г. Микроструктура и свойства дисперсных грунтов (опыт применения кластерного анализа) // Известия вузов. Геология и разведка. 2013. № 3. С. 39–45.

*Статья поступила 06.09.2015 г.*