

УДК 55; 624.131

В.Т. Трофимов¹**ОБ ИТОГАХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ
МАССИВОВ ЛЁССОВЫХ ПОРОД СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ**

Сформулированы итоги изучения морфологических, ретроспективных и прогнозных инженерно-геологических задач в отношении массивов лёссовых пород. Показано, что максимальные значения относительной просадочности достигают 0,17–0,21, мощности просадочной толщи при природной нагрузке — 55 м; максимальное количество циклов лёссовых пород, сложенных просадочными грунтами, достигает 10; чаще всего количество просадочных погребенных почв в одном разрезе лёссовой толщи не превышает 4–5.

Главный итог решения ретроспективных инженерно-геологических задач — выдвижение 8 гипотез и механизмов образования просадочности лёссовых пород, на базе которых сформулированы общая теория ее формирования и 4 частных. Итоги решения прогнозных задач — разработка методов расчета ожидаемых величин просадки массивов лёссовых пород при различных режимах их замачивания и создание гидрогеомеханических, геохимических, геотехнических и комплексных методов улучшения свойств массивов лёссовых пород.

Ключевые слова: инженерная геология массивов лёссовых пород, просадочность лёссовых пород, гипотезы и теории формирования просадочности, методы улучшения свойств лёссовых пород.

The results of investigation of morphological, retrospective and prognoses engineering-geological tasks concerning loess soils massifs are formulated. It is shown that maximum values of relative subsidence reach 0,17–0,21, thickness of subsiding soil massif under natural load is about 55 m, maximum amount of loess soils cycles composed of subsiding soils reaches 10, more often the amount of buried soils of loess soils massif cross section doesn't exceed 4–5 ones.

The main result of solution of retrospective engineering-geological tasks is the proposal of hypothesizes and mechanisms of loess soils subsidence formation. They are the base for four special and general theory of subsidence formation.

The result of solution of prognoses engineering-geological tasks is the elaboration of methods for calculation the expected subsidence of loess soils massifs under different mode of their wetting and the development of different methods (hydrogeomechanical, geochemical, geotechnical and complex) of improvement of loess soils massifs properties.

Key words. Engineering geology of loess soils massifs, subsidence of loess soils, hypothesizes and theories of subsidence formation, methods of improvement of loess soils properties.

Введение. Среди огромного многообразия природных геологических образований, которые используются человечеством в качестве грунтов, большая роль принадлежит лёссовым породам. Они распространены чрезвычайно широко и установлены, хотя и в принципиально разных объемах, на всех континентах Земли, исключая Антарктиду [Лысенко, 1978; Лёссовый..., 2001]. Эти породы залегают в самой верхней, «покровной» части разреза континентов Земли и представлены главным образом четвертичными континентальными образованиями разного генезиса.

Лёссовыми породами, по подсчетам Э.В. Кадырова, покрыто 4 255 600 км² поверхности континентов Земли, что составляет 3,2% площади суши нашей планеты. Уже многие годы, точнее века, эти породы привлекают внимание человека. Их исследуют геологи, почвоведы, географы. Массивы, сложенные этими породами, осваивают строители, мелиораторы, работники сельского

хозяйства. Во всех районах, где встречаются эти породы мощностью от нескольких метров до нескольких десятков и даже сотен метров, их состав специфичен и достаточно близок: это песчано-глинисто-пылеватые системы, основная часть которых состоит из тонкопесчаных (0,1–0,05 мм) и особенно крупнопылеватых (0,05–0,01 мм) частиц. Пылеватость этих пород «усилена» и тем, что в природных условиях более тонкие пылеватые и глинистые частицы агрегированы до размера крупнопылеватых.

Лёссовые породы обладают и рядом специфических инженерно-геологических особенностей, которыми они выделяются в громадном многообразии грунтов. К категории таких особенностей в первую очередь относятся их малая естественная влажность, высокая пористость, чрезвычайно низкая водопрочность и главное — просадочность (последняя выражается в способности лёссовых пород в напряженном состоянии достаточно резко

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, заведующий кафедрой, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: trofimov@rector.msu.ru

во времени уменьшать объем при замачивании). В итоге в инженерной геологии сформировался научно-практический раздел, получивший название **инженерная геология массивов лёссовых пород**. В его рамках *исследуются инженерно-геологические условия массивов лёссовых пород, закономерности их формирования и пространственно-временного изменения под влиянием природных и антропогенных (техногенных) современных и прогнозируемых геологических процессов* [Трофимов, 2008]. Этот комплекс исследований и данных направлен на решение *трех типов инженерно-геологических задач* в отношении массивов лёссовых пород: *морфологических, ретроспективных и прогнозных*. Решение задач первого типа позволяет оценить современные особенности состава, строения, состояния и свойств лёссовых пород и слагаемых ими массивов, второго типа — восстановить историю формирования названных особенностей этого массива, включая просадочность; третьего типа — предсказать поведение лёссовых пород при их хозяйственном освоении. Изучение опыта строительства на массивах лёссовых пород в этом плане следует рассматривать как проверку (верификацию) решения прогнозной задачи.

В инженерно-геологическое изучение этих специфических пород наиболее существенный вклад внесли Ю.М. Абелев, В.М. Алексеев, М.Н. Алексеев, В.П. Ананьев, Л.Г. Балаев, В.С. Быкова, А.А. Величко, Б.Ф. Галай, Н.Я. Денисов, Р.С. Зиангиров, Р.С. Ильин, Э.В. Кадыров, В.А. Королев, В.Ф. Краев, Н.И. Кригер, В.И. Крутов, А.К. Ларионов, М.П. Лысенко, Г.А. Мавлянов, А.В. Минервин, С.Г. Миронюк, С.С. Морозов, А.А. Мустафьев, В.А. Обручев, В.И. Попов, Е.М. Сергеев, В.Н. Соколов, В.Т. Трофимов, Л.И. Турбин, Ш.Э. Усупаев, П.В. Царев, Я.Е. Шавич, М.Ш. Шерматов, а также Ф.А. Никитенко, И.Д. Седлецкий, Г.А. Сулакшина, И.В. Финаев и др. Благодаря их исследованиям, а также труду огромной армии изыскателей были достигнуты выдающиеся результаты в изучении этих пород как грунтов, в решении каждого из ранее названных типов задач.

Достижения решения морфологических инженерно-геологических задач при изучении массивов лёссовых пород. Главные итоги инженерно-геологического изучения массивов лёссовых пород в области решения *морфологических* задач следующие: а) получены достоверные представления о распространении, составе, строении, состоянии и свойствах лёссовых пород и сложенных ими массивов; б) установлена природа просадочности лёссовых грунтов или, иначе говоря, причинно-следственные связи в системе современный лёссовый грунт—просадка; в) выделены типы массивов лёссовых пород по суммарной величине просадки и характеру изменения просадочности по разрезу; г) показаны региональные закономерности рас-

пределения массивов просадочных лёссовых пород и мощности просадочных толщ; д) разработаны требования к инженерно-геологическим изысканиям в районах распространения просадочных лёссовых пород.

В дополнение отмечу, что механизм развития просадки — процесса реализации просадочности лёссовых пород при их замачивании — к настоящему времени изучен достаточно подробно [Абелев, Абелев, 1968; Ананьев и др., 1976; Денисов, 1953; Крутов, 1982; Мустафаев, 1989]. Основательно изучено и само это свойство, и факторы, его определяющие, и закономерности распространения просадочных разностей лёссовых образований в Северной Евразии [Абелев, Абелев, 1968, Ананьев, 2004, Ананьев и др., 1976; Карта..., 1989; Кригер, 1965, 1986; Кригер и др., 1981; Крутов, 1982, 1998; Ларионов и др., 1959; Лёссовые..., 1966, 1986, 2001; Лысенко, 1978; Мавлянов, 1958; Опорные..., 2008; Трофимов, 2008]. Также установлено, что просадочными свойствами могут обладать и другие разности горных пород: пылеватые засоленные и незасоленные пески, вулканические пеплы, искусственные грунты.

Накопленные к настоящему времени данные позволили описать экстремальные значения показателей просадочности лёссовых пород Северной Евразии:

— максимальные значения относительной просадочности лёссовых пород часто достигают 0,09–0,15 (такие величины установлены, например, при изысканиях в городах Одесса, Херсон, Никополь, Запорожье, Грозный, Сумгаит, Ташкент и др.); в опорном разрезе Чирчик при нагрузке 0,3 МПа она составила 0,17 (глубина 3–9 м), а при природной нагрузке — 0,21 (глубина 22 м);

— максимальные значения относительной просадочности грунтов погребенных почв в циклитически построенных толщах лёссовых пород, судя по данным изучения опорных инженерно-геологических разрезов, достигают 0,115–0,129 (в II–IV погребенных почвах) при природной нагрузке и 0,146–0,168 (в I–III погребенных почвах) при нагрузке 0,3 МПа;

— минимальные величины начального просадочного давления имеют, по В.И. Крутову [Крутов, 1998], значения <0,02 МПа для чрезвычайно просадочных лёссовых грунтов, относительная просадочность которых превышает 0,12 при давлении на грунт 0,3 МПа;

— максимальные значения мощности просадочной зоны (толщи) в циклитически построенных разрезах лёссовых пород составляют 43–55 м (разрез Адырный, Душанбинская впадина и район г. Будённовск, Северное Предкавказье соответственно); чаще всего просадочные разности лёссовых пород залегают до глубины 30 м [Опорные..., 2008];

— максимальное количество циклитов лёссовых пород, сложенных просадочными грунтами,

составляет 10 (опорный разрез Тирасполь, водораздельное плато); в разрезе Чирчик просадочны грунты 6 верхних циклитов, в разрезах Отказное и Адырный — 5 циклитов [там же];

— максимальное количество просадочных грунтов погребённых почв, установленных в одном разрезе (Тирасполь), — 9, чаще всего количество просадочных погребённых почв в одном разрезе не превышает 4–5 [там же];

— максимальные прогнозные значения величины суммарной просадки толщ лёссовых пород составляют, по данным Г.М. Вариниченко, 347 см при пространственном источнике обводнения и 228 см при линейном источнике; они рассчитаны для опорного разреза Келес (Узбекистан) [Опорные..., 2008].

Достижения решения ретроспективных инженерно-геологических задач при изучении массивов лёссовых пород. Главные итоги в области решения инженерно-геологических *ретроспективных* задач таковы: а) выдвинуто 8 гипотез и механизмов возможного формирования просадочности лёссовых грунтов; работоспособность 4 из них доказана данными лабораторного и полевого физического моделирования; б) установлены геолого-генетические закономерности формирования просадочности лёссовых грунтов и сложенных ими массивов, доказывающие, помимо прочего, полигенность просадочных разностей лёссовых пород; в) показано, что просадочность лёссовых пород формируется при реализации различных механизмов в ходе прогрессивного или регрессивного литогенеза; в силу этого в реальных разрезах она может быть сингенетической, эпигенетической, син-эпигенетической и эписингенетической; г) сформулированы общая и частные теории формирования просадочности лёссовых пород.

Решение ретроспективных задач заняло длительный период. В истории изучения генезиса просадочности лёссовых пород четко обособляются два направления и три этапа исследований. Эти два направления, по существу, не привязаны к какому-либо одному этапу, и в этом плане они «сквозные» [Трофимов, 1999, 2003, 2008]. Исследователи *первого направления* (А.В. Минервин, Е.М. Сергеев и др.) связывали формирование просадочности с определёнными по генезису пылеватыми отложениями (просадочный лёсс — эоловые отложения, просадочный лёсс — элювиальная порода и т.п.). Представители *второго направления* (В.П. Афаньев, Б.Ф. Галай, Н.Я. Денисов, В.И. Коробкин, Н.И. Кригер, Г.А. Мавлянов, А.В. Минервин, В.Т. Трофимов и др.) убедительно показали, что просадочными могут быть отложения разного генезиса.

Первый этап изучения генезиса просадочности лёссовых пород охватывает период 1940–1960 гг. Главная его черта — формулировка серии гипотез о происхождении этого свойства лёссовых пород

(хотя ряд из них, связанных с проявлением криогенных процессов, был постулирован существенно позже, в 1980–1990 гг.). Среди них гипотезы Н.Я. Денисова, А.В. Минервина и Е.М. Сергеева. Содержание механизмов формирования просадочности лёссовых пород в соответствии с этими гипотезами принципиально различно и специально рассмотрено мной в работах [Трофимов, 1999, 2003, 2008].

Второй этап охватывает 1970-е — начало 1990-х гг. Главная его особенность — проведение обширного комплекса лабораторных и полевых (в массиве) исследований формирования просадочности лёссовых пород. Эти работы осуществлены Т.Г. Алексеенко, Т.В. Андреевой, В.С. Бондаренко, Д.В. Бородулиной, А.С. Ветровым, А.М. Ворониным, Б.Ф. Галаем, М.Р. Горским, О.Н. Ереминой, А.В. Ершовой, Э.В. Кадыровым, Н.В. Коломийцевым, Н.Н. Комиссаровой, В.А. Королевым, Е.Ю. Куликовой, Н.Г. Мавляновым, Н.Х. Тимирязевой, В.Т. Трофимовым, М.И. Яковлевым. Полученные ими данные позволили оценить работоспособность высказанных ранее и новых гипотез и вплотную приблизиться к созданию экспериментально подтвержденных представлений о происхождении просадочности лёссовых пород. Итоги этого этапа суммированы мной в 1999 г. в монографии «Генезис просадочности лёссовых пород» [Трофимов, 1999].

Третий этап характеризуется теоретическим обобщением накопленных данных, формулировкой частных теорий формирования просадочности лёссовых пород разных генетических типов (эоловых, пролювиальных, аллювиальных и др.) и общей теории формирования просадочности лёссовых пород. Определенные итоги этой работы изложены мной в монографии «Теория формирования просадочности лёссовых пород» [Трофимов, 2003]. Принципиально иной подход к решению проблемы генезиса просадочности позже изложен в книге Ю.Б. Текучева и Л.И. Бондаревой «Происхождение лёссовых пород и их просадочности» [Текучев, Бондарева, 2005].

Достижения решения прогнозных инженерно-геологических задач при изучении массивов лёссовых пород. Главные итоги решения *прогнозных* задач можно сформулировать так: а) разработаны методы расчета ожидаемых величин просадки массивов лёссовых пород при различных режимах их загрузки и замачивания; б) создано и опробовано на практике большое число методов улучшения свойств массивов лёссовых пород. *Первая позиция* в теоретическом плане и применительно к проектированию оснований в наиболее полном объеме освещена в работах В.И. Крутова [1982], А.А. Мустафаева [1989], в Пособии по проектированию оснований зданий и сооружений [Пособие..., 1986] и др. Для опорных инженерно-геологических разрезов лёссовых пород Северной

Евразии прогнозные величины суммарных просадок приведены в [Опорные..., 2008]. Региональный прогноз возможных суммарных просадок отражен на Карте прогноза просадочности территории распространения лёссовых пород в СССР масштаба 1:2 500 000 [Карта..., 1989].

Описание различных *методов управления просадочностью лёссовых пород* приведено в работах Ю.М. и М.Ю. Абелевых [Абелев, Абелев, 1968], В.П. Ананьева [Ананьев, 1976], С.Д. Воронкевича [Воронкевич, 2005], В.И. Крутова [Крутов, 1982], И.М. Литвинова [Литвинов, 1977] и др. В таблице представлена классификация методов управления

просадочностью массивов лёссовых пород, составленная с учетом высказанных позиций. В ней выделены 4 группы, 7 классов, 9 видов и более 30 основных методов управления просадочностью массивов лёссовых пород.

Все это позволило предложить эффективные методы проектирования и устройства оснований и фундаментов на просадочных лёссовых грунтах, добиться увеличения объема строительства инженерных сооружений разных типов в районах, сложенных такими образованиями. Однако и до настоящего времени сооружения, возведенные на просадочных лёссовых грунтах, нередко испытыва-

Таблица

Классификация методов управления просадочностью массивов лёссовых пород [Трофимов, 2008]

Группы методов	Классы методов	Виды методов	Основные методы
Гидрогеомеханические	Методы, направленные на устранение просадочности лёссовых пород уплотнением и увлажнением	Методы механического уплотнения просадочных лёссовых пород	Уплотнение тяжелыми трамбовками Вытрамбовывание котлованов и траншей Создание подушек из лёссовых грунтов Уплотнение взрывами Уплотнение гидравлическое Уплотнение катками
		Методы гидромеханического устранения просадочности массива лёссовых пород	Замачивание массивов заливкой водой котлованов Глубинное замачивание массивов Уплотнение взрывами предварительно замоченного массива Виброуплотнение замоченных массивов Пропаривание массива лёссовых пород
Геохимические	Методы, направленные на устранение просадочности массивов лёссовых пород с помощью технологий физико-химической мелиорации	Методы термического устранения просадочности массива лёссовых пород	Нагнетание в массив предварительно нагретого воздуха Сжигание топлива в укрепляемом массиве
		Методы физико-химического инъекционного крепления массивов просадочных лёссовых пород	Силикатизация Аммонизация Закрепление карбамидной смолой Кольматирование Укрепление массива лёссовых пород гидравлическими вяжущими
Геотехнические	Методы, основанные на срезке просадочных лёссовых пород	Методы индустриальной срезки просадочных лёссовых пород	Срезка просадочных грунтов при планировании территории под здания и сооружения Срезка просадочного грунта на больших площадях при устройстве глубоких подвалов, колодцев и др.
	Методы, основанные на армировании массива просадочных лёссовых пород	Методы техногенного каркасообразования непосредственно в массиве просадочных лёссовых пород	Создание песчаных подушек Погружение микросвай Забивка свай, не прорезающих массив просадочных грунтов Создание буронабивных и буруинъекционных свай, не прорезающих массив просадочных грунтов
	Методы, основанные на полной прорезке массива просадочных лёссовых пород	Прорезка просадочной толщи лёссовых пород глубокими фундаментами	Сооружение забивных или набивных свай, прорезающих лёссовые породы Создание столбов укрепленного грунта, прорезающих массив просадочных лёссовых грунтов
	Методы, основанные на управлении влажностным режимом массивов просадочных лёссовых пород	Водозащитные мероприятия	Планировка территории Устройство под зданиями и сооружениями мало-водонепроницаемых экранов Качественная засыпка пазух котлованов и траншей Отвод аварийных вод за пределы зданий и в ливнесточную сеть
Комплексные (комбинированные)	Методы, основанные на комплексировании разных классов методов	Комплексы мероприятий, включающие различные сочетания методов первых трех групп	Комплекс методов, включающий частичное устранение просадочных свойств лёссовых пород, конструктивные и водозащитные мероприятия

ют существенные деформации, что обуславливает необходимость дальнейшего изучения массивов просадочных лёссовых пород не только в практическом, но и в теоретическом аспектах.

Задачи дальнейшего инженерно-геологического изучения массивов просадочных лёссовых пород. В качестве таковых назовем следующие:

а) продолжение исследований по всем традиционным направлениям изучения просадочности массивов лёссовых пород;

б) исследование просадочности грунтов погребенных почв циклично построенных толщ лёссовых пород, поскольку многие их разности в

аридной зоне проявляют просадочные свойства. Обобщение данных по этому аспекту в монографии «Просадочность грунтов погребенных почв массивов лёссовых пород»;

в) создание фундаментальной по содержанию монографии «Инженерная геология массивов лёссовых пород», в которой необходимо рассмотреть полный комплекс проблем, начиная от характеристики состава, строения и просадочности и кончая опытом строительства и эксплуатации зданий и сооружений, возведенных в пределах массивов просадочных лёссовых пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абелев Ю.М., Абелев М.Ю.* Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. М.: Стройиздат, 1968. 432 с.
- Ананьев В.П.* Техническая мелиорация лёссовых грунтов. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1976. 120 с.
- Ананьев В.П.* Лёссовый покров России. М.: Юриспруденция, 2004. 108 с.
- Ананьев В.П., Гильман Я.Д., Коробкин В.И.* и др. Лёссовые породы как основания зданий и сооружений. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 1976. 216 с.
- Воронкевич С.Д.* Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.
- Денисов Н.Я.* Строительные свойства лёсса и лёссовидных суглинков. М.: Госстройиздат, 1953. 154 с.
- Карта прогноза просадочности территории распространения лёссовых пород в СССР. Масштаб 1:2 500 000. М., 1989.
- Кригер Н.И.* Лёсс, его свойства и связь с географической средой. М.: Наука, 1965. 296 с.
- Кригер Н.И.* Лёсс. Формирование просадочных свойств. М.: Наука, 1986. 133 с.
- Кригер Н.И., Котельникова Н.Е., Лаврусевич С.И., Севостьянов В.В.* Закономерности формирования просадочных свойств лёссовых пород Средней Азии и Южного Казахстана. М.: Наука, 1981. 165 с.
- Крутов В.И.* Основания и фундаменты на просадочных грунтах. Киев: Будивельник, 1982. 224 с.
- Крутов В.И.* Классификация просадочных лёссовых грунтов // Геоэкология. 1998. № 3. С. 55–64.
- Ларионов А.К., Приклонский В.А., Ананьев В.П.* Лёссовые породы СССР и их строительные свойства. М.: Наука, 1959. 368 с.
- Лёссовые породы СССР. М.: Наука, 1966. 256 с.
- Лёссовые породы СССР / Под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. М.: Недра, 1986. Т. 1. 232 с.; Т. 2. 276 с.
- Лёссовый покров Земли и его свойства / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 464 с.
- Литвинов И.М.* Укрепление и уплотнение просадочных грунтов в жилищном и промышленном строительстве. Киев: Будивельник, 1977. 184 с.
- Лысенко М.П.* Лёссовые породы. Л.: Недра, 1978. 208 с.
- Мавлянов Г.А.* Генетические типы лёссов и лёссовидных пород центральной и южной частей Средней Азии и их инженерно-геологические свойства. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1958. 610 с.
- Мустафаев А.А.* Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах. М.: Высшая школа, 1989. 578 с.
- Опорные инженерно-геологические разрезы лёссовых пород Северной Евразии / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: КДУ, 2008. 608 с.
- Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01.-83). М.: Стройиздат, 1986. 416 с.
- Текучев Ю.Б., Бондарева Л.И.* Происхождение лёссовых пород и их просадочности. Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2005. 152 с.
- Трофимов В.Т.* Генезис просадочности лёссовых пород. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 271 с.
- Трофимов В.Т.* Теория формирования просадочности лёссовых пород. М.: ГЕОС, 2003. 275 с.
- Трофимов В.Т.* Инженерная геология массивов лёссовых пород. М.: КДУ, 2008. 398 с.

Поступила в редакцию
12.01.2016